207731167

UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AGROPECUARIAS

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AMBIENTALES



MANUAL DE FOTOGRAMETRÍA EN PALEONTOLOGÍA

TRABAJO DE TITULACIÓN EN LA MODALIDAD DE PRODUCCIÓN DE MATERIALES EDUCATIVOS OPCIÓN PAQUETE DIDÁCTICO

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN BIOLOGÍA

PRESENTA:

ERICK MIGUEL DÍAZ DE LEÓN MUÑÓZ

Las Agujas, municipio de Zapopan, Jalisco. Enero de 2017

El presente trabajo fue elaborado en el Centro de Estudios en Zoología, bajo la dirección del Maestro en Ciencias Margarito Mora Núñez.

"...el señor Fridriksson me dio con su último adiós este verso de Virgilio, que parecía escrito justo para nosotros, pobres viajeros que mirábamos con incertidumbre el camino:

Et quacumque viam dederit fortuna sequamur"

Julio Verne. Viaje al Centro de la Tierra

Agradecimientos

A la Universidad de Guadalajara,

Por brindarme la oportunidad de formarme como profesionista en una de las más extraordinarias y sorprendentes áreas del conocimiento.

A mis compañeros

Que sin su compañía y amistad no hubiera tenido energías para concluir la carrera, a Lizbeth García, Jesús Báez, Carlos Cotero, Daniela Treviño, José de Jesús Berber, Nadia Martínez por revisar mi trabajo y aconsejarme, a todos los Orcos por los momentos de diversión que hacían disfrutar la universidad.

Al Doctor Eduardo Jiménez Hidalgo

Quien me mostró por primera vez una réplica virtual 3D y que me motivó a escribir el manual.

A todas las empresas que me contrataron

Y gracias a las cuales pude solventar los gastos de la carrera, a Vitruark, a Tokai, Prorgánica y Corporativo Magnas

A los colegas y amigos que conocí en la UMAR

A Karla Ayala y Andrea Villegas, con quienes descubrí mi pasión por la paleontología

A todos mis amigos y familiares

Quienes me apoyaron, alentaron y alegraron en mi vida diaria durante todos estos años de estudio.

A mis sinodales y director

A los Maestros Margarito Mora, Oscar Carbajal, Carlos Anguiano, Miguel Vásquez y Pablo Martínez por su tiempo, apoyo y consejos para la realización de éste trabajo

Contenido

Introducción	5
Antecedentes	6
Objetivos	8
Objetivo General	8
Objetivos específicos	8
Materiales y métodos	9
Resultados	9
Manual de Fotogrametría en Paleontología	10
Introducción	12
Fotogrametría VS escáner	13
Objetivos de la fotogrametría en la paleontología y la docencia	15
Ejemplos de fotogrametría aplicada en paleontología	17
Materiales para la creación de un modelo 3D	19

1. Hardware	
2. Software	20
3. Elementos complementarios (opcionales)	
Creación del modelo 3D	23
Toma de Fotografías	24
Creación de la nube de puntos con VisualSFM	28
Edición de la nube de puntos	
Creación de la malla	
Aplicación de la textura	
Escalar a tamaño real	41
Conclusiones	40
Problemas comunes y sus soluciones	43
Glosario	45
Anexo	46
Literatura citada	48
Conclusiones	50
Referencias	
Páginas web de interés	

Introducción

La fotogrametría es una técnica cuyo objetivo es estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera utilizando esencialmente medidas hechas sobre una o varias fotografías de ese objeto (Otero *et al.*, 2010). Uno de los principios fundamentales de la fotogrametría es la triangulación; es decir, a partir de fotografías tomadas desde, al menos, dos posiciones diferentes se pueden establecer las líneas que unen puntos del objeto 3D con sus correspondientes homólogos en las imágenes. Si se calcula la intersección analítica de estas líneas, se determinarán las coordenadas 3D de los puntos de interés del objeto (Caracuel *et al.*, 2002).

El término fotogrametría no es una palabra de reciente creación. Fue utilizado por primera vez durante la segunda mitad del siglo XIX por el arquitecto Albrecht Meydenbauer, quien tuvo la idea de utilizar las fotografías para la documentación de las edificaciones, y de este modo, en caso de que se vieran dañadas podrían ser restauradas. Enfocado en esta idea y no sin superar grandes obstáculos,

fundó la primera institución mundial dedicada a la documentación de objetos del patrimonio cultural (Albertz, 2002).

La idea original de la preservación del patrimonio cultural, se vio auxiliada por nuevas herramientas en el siglo XXI, como el uso del escáner que ha llegado a reemplazar a la fotogrametría en muchos casos. El uso del escáner presenta bastantes ventajas; se trata de un proceso rápido, preciso y completo, sin embargo, aún tiene algunos problemas y limitaciones. En primer lugar, el alto costo que representa el adquirir el equipo y su rápida obsolescencia, en segundo lugar, la experiencia necesaria para sacar el máximo provecho de la tecnología. En tercer lugar, se encuentra la disponibilidad, ya que en algunos países pueden resultar complicados de encontrar y transportar y por último algunos escaneos aún necesitan una cobertura fotográfica para agregar la textura al objeto (Pisa et al., 2010). La ventaja de la fotogrametría es que no es necesario hacer una nueva inversión ya que el proceso puede llevarse a cabo con elementos básicos que ya suelen tenerse en la mayoría de los casos. Éstos son esencialmente dos: una cámara fotográfica y una computadora. De este modo se reducen enormemente los gastos necesarios, los cuales pueden llegar a ser cero en realidad, si ya se cuenta con estos elementos como parte de las herramientas de cualquier investigador en la actualidad.

La generación de modelos tridimensionales actualmente comienza а diversificarse y difundirse a gran escala, debido a las recientes técnicas y herramientas que permiten la impresión en 3D. La obtención de réplicas de objetos en tercera dimensión actualmente está ayudando a los investigadores dentro de diversos campos. Un claro ejemplo es en la medicina, donde ahora es posible imprimir réplicas para producir prótesis precisas para cada individuo a un bajo costo. Otra aplicación, está en la paleontología ya que permite realizar análisis morfológicos más precisos que a partir de simples fotografías en dos dimensiones. Actualmente existen programas especializados en realizar análisis de morfometría geométrica para poder comparar dos o más elementos similares y así reconstruir los fragmentos faltantes de un fósil o establecer las relaciones evolutivas que existen entre éstos a través de cladogramas. Las imágenes 3D proveen las bases para la reconstrucción digital de organismos con más objetividad de lo que era posible anteriormente con la información incompleta que usualmente los paleontólogos se veían obligados a trabajar (Cunningham et al., 2014). Por último, una aplicación bastante útil para a fotogrametría es ayudar a la difusión del material y el conocimiento de la diversidad del público en general

Antecedentes

Anteriormente la paleontología virtual representaba un gran gasto para los investigadores, por lo que no se presentaban los resultados al público (Rahman *et al.,* 2012). Con el desarrollo de los programas gratuitos y la accesibilidad a las

tecnologías de la información y la comunicación está aumentando cada vez más su uso dentro del área, prueba de ello es la cantidad de artículos recientes referentes al tema que se pueden encontrar publicados.

Las técnicas fotogramétricas digitales constituyen una metodología valiosa para la reconstrucción morfológica y la caracterización métrica de objetos, que ha sido escasamente aplicada en ciencias de la tierra y especialmente en paleontología (Caracuel *et al.*, 2002). Desde principios del siglo XX algunos investigadores se planteaban la utilidad de generar modelos tridimensionales de material fósil, especialmente desde el punto de vista de los análisis morfométricos más precisos. Durante los últimos años han surgido alrededor del mundo diversos proyectos que tienen por objeto el crear replicas digitales tridimensionales de fósiles con diversos objetivos tales como son la divulgación, la docencia y la investigación (Caracuel *et al.*, 2002, Cunningham *et al.*, 2014,

Remondino *et al.* (2010) comprobaron la eficacia y utilidad de la fotogrametría aplicada en la icnología. Mediante una combinación con técnicas de escaneado con láser, logró obtener excelentes resultados de huellas de dinosaurio para la preservación y difusión del registro fósil. Afirmaron que con ésto en un futuro se podrán interpretar y deducir distintas características en el andar de estos animales.

En 2013 Joint Information Systems Committee (JISC) y el Servicio Geológico Británico lanzaron la primera colección virtual de fósiles al público (Fossil launch marked at Cambridge Museum, 2013), *GB3D Type Fossils* se trata de una colección de cientos de modelos en 3D y de miles de imágenes en su gran mayoría pertenecientes a invertebrados. En su sitio web muestran además de las imágenes y los modelos, la identidad taxonómica de la especie, y en caso de estar disponible, la procedencia del espécimen, su número de registro, la localidad dónde se colectó y el nombre del colector. Su especialidad es mostrar los tipos que se encuentran en museos británicos (holotipos, paratipos, neotipos, sintipos, lectotipos, paralectotipo, topotipo e isotipo) y también proporcionan un enlace para descargar los archivos y trabajar con ellos. El problema con esta base es la interfaz y diseño ya que lo hace poco llamativa y monótona.

Por su parte el Museo de Paleontología de la Universidad de Michigan lanzó *UMORF* donde de igual manera se presentan tanto modelos en 3D como imágenes. Muestran modelos de gran calidad obtenidos por distintos métodos, tanto con escáner como por tomografías de rayos-X, y por fotogrametría (Project history, s.f.). Su fortaleza es su interfaz, ya que permite por un lado manipular el modelo desde el navegador sin necesidad de instalar algunos complementos, y por otro permite realizar mediciones del fósil. En primer lugar, al ingresar en el sitio web, brinda el ejemplo con un mastodonte completo el cual es posible rotar, acercar e incluso medir; es posible seleccionar algún hueso en específico y se abrirá en otra ventana ahora con la textura original del elemento. Desafortunadamente es una base que crece lentamente y el mastodonte es el

único ejemplar "completo" que muestran, el resto se trata de partes aisladas de otras especies.

Otro recurso en línea es Digimorph. se trata de otra base de datos hecha en colaboración con la Universidad de Texas, en la cual se muestran los modelos obtenidos principalmente con un proceso de rayos-X a manera de capas para reconstruir el objeto llamadas tomografías (Digital Morphology - A unique biological visualization library, s. f.). Esta técnica tiene la ventaja de que muestra la densidad del objeto, no solamente la parte visible, sino las cavidades no accesibles a la vista; la mayoría de los archivos son mostrados a manera de videos, con varias vistas a elegir, ya sea horizontal, coronal o sagital. La mayoría de los ejemplares mostrados son cráneos. Cuenta tanto con invertebrados como con peces, mamíferos, reptiles, anfibios, aves, etc., vivos y extintos. Un problema que se puede presentar con Digimorph es el uso de plug-in (complemento para el explorador de internet) que actualmente los navegadores están bloqueando debido a fallos de seguridad, lo cual puede complicar la visualización correcta de sus modelos en línea. Además, tiene el inconveniente de que se tratan de videos en su mayoría, los cuales sólo pueden adelantarse o atrasarse, limitando de esta manera las posibilidades de manipulación y exploración al usuario.

En cuanto a trabajos en México existen pocos casos en lo que respecta a la digitalización de fósiles. Gutiérrez-García *et al.* (2013, 2015) han trabajado con un método que permite obtener digitalizaciones de muy buena calidad, el punto fuerte de su trabajo se fundamenta en la utilización de franjas de luz proyectadas sobre el material, de este modo se puede recoger información muy precisa sobre la forma y los detalles de la superficie, además de dar excelentes resultados en muestras pequeñas como lo demuestran utilizando una mandíbula de ratón. Sin embargo, para una persona con pocos conocimientos sobre la técnica, resulta complicado de entender y aún más de experimentar con su propuesta. El uso de algoritmos y programas matemáticos avanzados dificultan en gran medida el aprovechamiento de sus avances por personas que no pretendan profundizar el tema.

Estos son algunos de los antecedentes en cuanto a bases de datos de fósiles en 3D. Adicionalmente existe información en artículos científicos que muestran las posibilidades de estudios que se pueden realizar con el uso de modelos virtuales. Un claro ejemplo es el reciente trabajo de Mounier y Lahr (2016) quienes, a través de modelos digitales de cráneos de diferentes tipos de homínidos, lograron reconstruir mediante un análisis con software de morfometría geométrica, el aspecto que probablemente tenía un antepasado común entre el *Homo sapiens y H. neanderthalensis,* conocido como *H. heidelbergensis.*

Justificación

A pesar del avance en las técnicas para la replicación virtual de material fósil, son pocos los trabajos que actualmente se publican en los que se hayan utilizado éstas, en comparación con el número de trabajos tradicionales que se suelen publicar, esto genera un sesgo en la información que se entrega al lector.

Por otro lado, la pérdida de material fósil por deterioro y daño causado por el manejo, son un problema constante en las colecciones científicas. Por esto, mediante un manual, se pretende mitigar en gran medida estos problemas.

Objetivos

Objetivo General

 Elaborar un manual para promover el uso de las nuevas tecnologías en la investigación y la docencia para proporcionar una metodología que ayudará a coleccionistas e investigadores a generar material digital que facilite la difusión de la paleontología.

Objetivos específicos

- Investigar y ubicar la metodología más sencilla y de bajo costo para la creación de réplicas virtuales
- Investigar y analizar los trabajos previos sobre el tema.
- Identificar la mejor propuesta de bajo costo para la creación de réplicas virtuales tridimensionales para su uso en paleontología

Materiales y métodos

- Se realizó una revisión literaria sobre los antecedentes del tema, así como el análisis de diferentes trabajos realizados a partir de las mismas técnicas y aplicados a campos similares dentro de la paleontología y anatomía en general, con la finalidad de realizar una comparación de los diferentes productos y los beneficios generados a partir de la creación de bases de datos de material en 3D.
- Se investigaron las diferentes alternativas y propuestas ofrecidas por diferentes desarrolladores de programas enfocados a la realización, edición y manipulación de mallas 3D a partir de fotografías, tratando de encontrar aquellos programas que se ajusten mejor a las necesidades del campo de la paleontología y al perfil del público a quién va dirigido el manual. Lo que significa que se dio prioridad a programas que requieran un mínimo conocimiento sobre computación, así como aquellos que

ofrezcan licencias gratuitas o a bajos costos, igualmente aquellos programas con interfaces más amigables con el usuario inexperto, pero a la vez lo suficientemente completos y potentes para generar modelos de calidad.

 Una vez completada la información previa se procedió a la redacción del manual, el cual fue escrito de la manera más sencilla y gráfica posible para su fácil entendimiento por cualquier persona, aún aquellas que tengan mínimos conocimientos de computación. Al final se agregaron ejemplos complementarios para que el lector/usuario pueda comprender de manera fácil lo que se espera obtener durante cada paso del modelado.

Resultados

Como resultado de la investigación, pruebas de software y redacción, se generó un manual de fotogrametría en paleontología donde se realiza una comparativa y análisis de las diferentes plataformas donde se pueden encontrar réplicas de material fósil y similares. Se detalla el material necesario, así como las técnicas, métodos y sugerencias para realizar una réplica lo más fiel posible y de buena calidad.

El manual se redactó tratando de manejar un lenguaje claro y simple además de reforzar y aclarar los pasos mediante imágenes para facilitar el entendimiento al usuario de cada paso y procedimiento.

Al final se anexan ejemplos prácticos en el cual se pueden apreciar los resultados obtenidos en cada paso, así como links a la web (Museo Virtual Nacional) donde se encuentran alojados dichos modelos y las fotografías en caso de que se quiera practicar.



E. Miguel Díaz de León Muñóz

Contenido

Contenido	3
Introducción	4
Antecedentes	5
Justificación	7
Objetivos	8
Objetivo General	8
Objetivos específicos	8
Materiales y métodos	8
Resultados	9
Introducción	
Fotogrametría VS escáner	
Objetivos de la fotogrametría en la paleontología y la docencia	
Ejemplos de fotogrametría aplicada en paleontología	
Materiales para la creación de un modelo 3D	
1. Hardware	
2. Software	21
3. Elementos complementarios (opcionales)	23
Creación del modelo 3D	23
Toma de Fotografías	24
Creación de la nube de puntos con VisualSFM	27
Edición de la nube de puntos	
Creación de la malla	
Aplicación de la textura	
Escalar a tamaño real	
Conclusiones	
Problemas comunes y sus soluciones	
Glosario	43
Anexo	
Literatura citada	46
Conclusiones	
Referencias	49
Páginas web de interés	50

Figura 1	
Figura 2	
Figura 3	
Figura 4	
Figura 5	
Figura 6	
Figura 7	
Figura 8	
Figura 9	
Figura 10	
Figura 11	
Figura 12	
Figura 13	
Figura 14	
- Figura 15	47 Figura
16.	

Introducción

La fotogrametría es una técnica cuyo objetivo es estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera, utilizando esencialmente medidas hechas sobre una o varias fotografías de ese objeto (Otero *et al.,* 2010). Partiendo de este concepto, el enfoque que se le da al presente trabajo es el crear modelos virtuales tridimensionales (3D) a partir de imágenes procesadas por software.

El término "fotogrametría" no es una palabra de reciente creación. Fue utilizado por primera vez durante la segunda mitad del siglo XIX por el arquitecto Albrecht Meydenbauer, quien tuvo la idea de utilizar las fotografías para la documentación de las edificaciones. De éste modo, en caso de que se vieran dañadas podrían ser restauradas. Enfocado en esta idea y no sin superar grandes obstáculos, fundó la primera institución mundial dedicada a la documentación de objetos del patrimonio cultural (Albertz, 2002).

Después de 150 años de la concepción de la idea, los métodos utilizados para la preservación del patrimonio se han diversificado. A principios de los 90's se dio una de las grandes innovaciones con el uso del Scanner o escáner que, a diferencia de las cámaras, los escáneres comúnmente emiten algún tipo láser o luz y cronometran el tiempo que tarda en regresar y así poder calcular las distancias y formas de los objetos. La fotogrametría, por su parte, ha ampliado su campo de aplicación. Actualmente uno de los usos más diversificados es la fotogrametría aérea; ésta se enfoca en el análisis de las fotografías tomadas a bordo de aeronaves o satélites, las cuales, combinadas con los modernos sistemas de geolocalización, son empleadas para el estudio de los terrenos (Otero, *et al.* 2010)

Dentro de las ciencias biológicas, quizá el área donde mayor difusión ha tenido es dentro del sector forestal. Mediante la comparación de fotografías aéreas a tomadas a lo largo de un periodo de tiempo, como años o las estaciones, se pueden hacer análisis de deforestación, cobertura del terreno e incluso diversidad de especies en una locación determinada. Esto implica que biólogos y agrónomos pueden contar con las herramientas necesarias para estimar el estado de preservación de los bosques y terrenos y finalmente poder plantear estrategias para la conservación de la vida silvestre (Otero, *et al.* 2010)

Fotogrametría VS escáner

La idea original de la preservación del patrimonio cultural, se vio auxiliada por nuevas herramientas en el siglo XXI, como el uso del escáner. Éste es uno de los que más se ha diversificado y popularizado y ha llegado incluso a reemplazar a la fotogrametría en muchos casos. Además del escáner y la fotogrametría existen gran variedad de técnicas dedicadas a la reconstrucción virtual 3D, cada una con sus ventajas y desventajas. Desde el uso de rayos X y las tomografías, hasta el uso de resonancia magnética, el problema con muchas de éstas es la relación de costo/beneficio, tanto costos de compra del equipo como costos cada vez que se utiliza. Por ejemplo, el costo de un equipo de resonancia magnética va desde 10,000 a 100,000 libras esterlinas (aproximadamente \$250,000 a \$2'500,000 pesos mexicanos), otras como el haz de iones resultan destructivos para el material a digitalizar (Cunningham *et al.*, 2014), de modo que, aun cuando existe una amplia gama de opciones, no todas resultan viables para el presupuesto de alguna investigación o para la preservación del material fósil.

El uso del escáner presenta bastantes ventajas, se trata de un proceso rápido, preciso y completo, sin embargo, aún tiene algunos problemas y limitaciones. En primer lugar, el alto costo que representa el adquirir el equipo y su rápida obsolescencia. En segundo lugar, la experiencia necesaria para sacar el máximo provecho de la tecnología. En tercer lugar, se encuentra la disponibilidad, ya que en algunos países del mundo pueden resultar complicados de encontrar y transportar. Por ultimo en algunos escaneos aún necesitan una cobertura fotográfica (Pisa *et al.,* 2010) para poder agregar una textura a la malla 3D.

La obtención de imágenes mediante técnicas de fotogrametría se dividen en tres grupos. Unos trabajan con algoritmos individuales y resuelven tareas específicas dentro del proceso de reconstrucción. Otros programas que crean un modelo 3D a partir de fotografías y por último programas online, donde se envían las imágenes por internet, se procesan de forma remota en "la nube" y de este modo se obtiene el modelo 3D (De la Torre-Canntero *et al.*, 2015).

Las técnicas modernas de fotogrametría presentan diversas ventajas en relación a las técnicas de escaneado más actuales. Básicamente la primera ventaja y la de más peso es la relación de costos. En primer lugar, el costo de un escáner económico es de más de \$7000 para los equipos más básicos. Se trata de equipos fijos con 2 escáner y una plataforma para colocar el objeto a escanear, los cuales dan una precisión de 0.5 mm, pero con la desventaja de la limitación en el tamaño del objeto (250 mm de diámetro X 205 mm de altura) además del peso que soportan es de 3 kg, lo cual es una clara desventaja si lo que se requiere es trabajar con fósiles ya que estos son muy diversos en pesos y tamaños (Figura 1).



Figura 1. Escáner PrintME 3D - Bq Ciclop 3D. Costo aproximado \$7,500 MN

En segundo lugar, es posible encontrar equipos de mucha mayor precisión con la ventaja de ser portátiles y manejarse con la mano, el gran inconveniente que presentan es su elevado costo, llegando a costar más de \$300,000 lo cuál en muchos casos se sale del presupuesto de investigadores y muchas veces no justifica su compra al no ser una prioridad en la investigación que se lleva a cabo (Figura 2).



Figura 2. Escáner laser Minolta Vivid 910. Costo aproximado de \$150,000 MXN

La segunda ventaja por parte de la fotogrametría es que no es necesario hacer una nueva inversión ya que el proceso puede llevarse a cabo con elementos básicos que ya suelen tenerse en la mayoría de los casos. Éstos son esencialmente dos: una cámara fotográfica y una computadora. Para obtener mejores resultados es necesario contar con un mejor equipo.

Aún si se asume la adquisición de un nuevo equipo fotográfico, una crucial diferencia entre la inversión al comprar un escáner o una cámara digital de alta calidad radica en el rango de utilidades que brinda cada uno al investigador. Gastar en un escáner de miles de pesos puede resultar poco beneficioso pues su uso se va a centrar única y exclusivamente en la creación de modelos 3D, por otro lado, invertir en una cámara fotográfica resulta más redituable, pues ésta se puede continuar usando en otros procesos durante la investigación e incluso durante la recreación. Claro está que para aquellos que se dedican a la investigación y publicación de artículos una cámara fotográfica con las funciones

mínimas ya es parte del material con que se debe contar, por lo que, no es necesario hacer una gran inversión.

Objetivos de la fotogrametría en la paleontología y la docencia

A más de 200 años de los primeros trabajos de Cuvier y a más de 100 años de los de Cope y Marsh la paleontología ha realizado grandes avances en distintos campos, desde evolución hasta de preservación del material sólo por mencionar algunos. Sin embargo, un campo que ha dado pasos más lentos ha sido el de la difusión. La publicación de artículos científicos se sigue haciendo en revistas, con la diferencia de que ahora se publican en internet y el contenido es digital. Fuera de esto, los artículos siguen conservando el principio básico; por ejemplo, en el caso de las descripciones, se presenta el texto descriptivo de las partes y ahora, a diferencia de los primeros años de la paleontología donde se usaban dibujos (los cuales cabe resaltar tienen gran mérito y aportan grandes detalles), se utilizan generalmente fotografías, ya sean a blanco y negro o a color, desde enormes huesos hasta cortes microscópicos. Actualmente se está proponiendo que los autores compartan parte de sus resultados de manera digital, esto incluyendo los modelos virtuales generados para que sus resultados puedan ser sometidos a análisis más objetivos, especialmente aquellos que trabajen con descripciones de nuevas características anatómicas (Cunningham et al. 2014)

El problema con el que muchos paleontólogos (especialmente los principiantes) se encuentran al momento de tratar de identificar un hueso o en ocasiones un simple fragmento, es que no se puede asignar a una parte del cuerpo. Es aquí donde juega un papel fundamental la anatomía comparada. Se recurre a atlas de osteología, se analizan los cuerpos completos tratando de asignarlo a alguno, sin embargo, bien sabido es que existen en ocasiones grandes diferencias y especializaciones entre la anatomía entre los organismos. A veces, ya con una vaga idea de "qué puede ser" se recurre a una literatura más especializada, se revisan artículos, se leen descripciones y se compara con las fotografías que proporcionan. Pero en ocasiones esto no es suficiente, pues las fotografías dan sólo una visión en dos dimensiones (2D) del objeto. En ocasiones el autor proporciona dos ángulos del mismo elemento, pero generalmente sólo muestra una vista, muchas veces con lo que se cuenta es con un fragmento en vista dorsal y el autor sólo muestra la vista ventral, lo cual complica una comparación más objetiva. Numerosos fragmentos de huesos son almacenados y guardados en las colecciones científicas sin que se logre identificar "qué parte son" y mucho menos la identidad taxonómica. Aquí es donde la fotogrametría puede llegar a jugar un papel importante, contando con bases de datos especializadas (3D) se puede obtener material para realizar las comparaciones adecuadas e incluso análisis de morfometría geométrica con software especializado, con lo cual se podría realizar un análisis de coincidencia de ciertas formas o puntos.

Anteriormente el investigador tenía que acudir directamente al museo o colección para realizar una comparación de los ejemplares, lo cual se vuelve cada vez

menos necesario con el uso de los objetos 3D. Los modelos 3D permiten además una mejor conservación del objeto real, tal como sucede con las réplicas de los museos, las cuales tienen la finalidad de preservar el original en las mejores condiciones posibles.

Otros usos de los modelos digitales 3D se centran en la posibilidad de reconstrucción (virtual) de las partes no conservadas de los ejemplares, cuando se disponga de esa información en otros restos fósiles. De este modo se puede obviar las pérdidas de información debidas a procesos tafonómicos destructivos sobre los restos, que en ocasiones limitan su tratamiento taxonómico. De igual modo pueden ser corregidas sobre el modelo 3D las distorsiones (aplastamiento, fractura) que habitualmente afectan a los fósiles (Caracuel *et al.,* 2002).

Con la reciente implementación y difusión de las impresoras 3D, se podrán crear réplicas de objetos depositados en sitios lejanos, sin siquiera manipularlo y exponerlo a un desgaste o fractura por un inadecuado manejo o descuido, todo esto sin mencionar las técnicas de replicado que en ocasiones toman como molde el fósil y llegan a desprenderle fragmentos. De modo que una vez se mejoren los procesos y bajen más los costos, se podrán realizar réplicas de bajo costo tanto para exposición y decoración como para investigación, ya sean a escala o tamaño natural, ayudando de éste modo a la difusión y la generación de conocimientos.

El uso de la fotogrametría en la creación y difusión de material multimedia puede ser una herramienta de la cual maestros y alumnos se puedan ver beneficiados. Al respecto, De la Torre-Cantero *et al.* (2015) concluyen que ni el coste, ni la dificultad técnica, suponen un impedimento para utilizar estas réplicas en entornos educativos y los posibles usuarios de las mismas demuestran un evidente interés en su utilización. El método en el que el profesor es un proveedor de conocimiento ya elaborado está siendo reemplazado por nuevas metodologías de enseñanza que emplean nuevas tecnologías, tales como proyectores y material multimedia. La ventaja de esta práctica es que el docente puede presentar material interactivo, atractivo visualmente y capaz de captar la atención del alumno. Debido a que el material es interactivo, el estudiante puede manipularlo, lo que facilita la enseñanza y la comprensión de la anatomía y la osteología de los organismos tanto extintos como recientes.

Como ejemplo del uso en la didáctica y difusión tenemos que en el año 2012 réplicas de fósiles obtenidas por tomografías fueron impresas en 3D por el Museo Lapworth de Geología de la Universidad de Birmingham, Reino Unido durante un evento en el cuál se ofrecieron varias actividades para los residentes locales con lo que lograron obtener una gran participación del público en general, principalmente notaron que obtuvieron un gran interés por parte del público infantil, ya que pudieron manejar las réplicas con sus propias manos, lo que se considera como un gran cambio en las técnicas de enseñanza tradicionales sobre la paleontología, en la cual rara vez tiene el público en general la oportunidad de manipular un fósil real, esto supone un gran paso en la enseñanza y comprensión de la evolución por el público. Finalmente, con la correcta aplicación de las técnicas de fotogrametría, se pueden realizar fácilmente comparaciones y análisis de la evolución de las estructuras, diferencias y similitudes entre especies u organismos. Dado que estos modelos digitales 3D de restos paleontológicos favorecen una rápida comparación morfológica y morfométrica tridimensional de los fósiles, son útiles en aplicaciones taxonómicas y para caracterizar trayectorias evolutivas (Caracuel, *et al.,* 2002).

Ejemplos de fotogrametría aplicada en paleontología

En 2013, el Servicio Geológico Británico lanzó la primera colección virtual de fósiles al público, *GB3D Type Fossils* (Launching the world's first 3D virtual fossil collection, 2013) se trata de una colección de cientos de modelos en 3D, y miles de imágenes en su gran mayoría pertenecientes a invertebrados. En su sitio web muestran además de las imágenes y los modelos, la identidad taxonómica de la especie, y en caso de estar disponible, la procedencia del espécimen, su número de registro, la localidad dónde se colecto y el nombre del colector. Su especialidad es el mostrar los tipos que se encuentran en museos británicos (holotipos, paratipos, neotipos, sintipos, lectotipos, paralectotipo, topotipo e isotipo), proporcionan enlaces para poder descargar los archivos y trabajar con ellos. El problema con esta base es la interfaz y diseño ya que lo hace poco llamativa y monótona.

Por su parte, el Museo de Paleontología de la Universidad de Michigan lanzó UMORF, (Project history. s.f.) donde de igual manera se presentan tanto modelos en 3D como imágenes. Muestran modelos de gran calidad obtenidos por distintos métodos, tanto con escáner como por tomografías de rayos-X y por fotogrametría. Su fortaleza es su interfaz, ya que permite por un lado manipular el modelo desde el navegador, sin necesidad de instalar algunos complementos, y por otro permite realizar mediciones del fósil. Brinda como ejemplo un mastodonte completo, el cual es posible rotar, acercar e incluso medir; se puede seleccionar algún hueso en específico y se abrirá en otra ventana, pero con una textura. Sin embargo, la información crece lentamente y el mastodonte es el único ejemplar "completo" que muestran. El resto se trata de partes aisladas de otras especies.

Real 3D Anatomy es otro sitio que presenta modelos 3D de buena calidad, creado por la Universidad de Brístol (Introducing Real 3D Anatomy. 2011), presenta una interfaz interesante. Ella muestra los objetos a manera de "capas", es decir, es posible quitar huesos del esqueleto completo. Además, se puede seleccionar un hueso en específico y una vez abierto muestra el nombre de

alguna de las partes con sólo pasar el cursor sobre ella.

Desafortunadamente sólo cuenta con un ejemplar en su base, el de un perro.

Digimorph, se trata de otra base de datos hecha en colaboración con la Universidad de Texas (Digital Morphology - A unique biological visualization library @ DigiMorph.Org. s. f.). Este recurso muestra los modelos obtenidos principalmente con un proceso de rayos-X a manera de capas para reconstruir el objeto. Esta técnica tiene la ventaja de que muestra la densidad del objeto, no solamente la parte visible, sino las cavidades no accesibles a la vista. La mayoría de los archivos son mostrados a manera de videos, con varias vistas a elegir, ya sea horizontal, coronal o sagital. La gran mayoría de los ejemplares mostrados son cráneos. Cuenta tanto con invertebrados como con peces, mamíferos, reptiles, anfibios, aves, etc. tanto vivos como extintos. Un problema con Digimorph es el uso de plug-in que actualmente los navegadores están bloqueando debido a fallos de seguridad, por lo cual puede complicar la visualización correcta de sus modelos en línea. Además, la información se muestra como videos en su mayoría, los cuales sólo pueden adelantarse o atrasarse, limitando de esta manera las posibilidades de manipulación y exploración al usuario.

Por último, se encuentra *3D Museum*, actualmente perteneciente al Departamento de Geología de la Universidad de California. Utilizan un escáner laser para producir modelos 3D de diferentes organismos, tanto vivos como extintos (How 3D models were made. s. f.) Además, proporcionan una breve información sobre su clasificación. Desafortunadamente desde 2010 la página no se encuentra actualizada, por lo que el uso de complementos en el navegador de internet (que se ha detectado que cuentan con fallos de seguridad) complican el uso de la página.

White *et al.* (2013) utilizó una metodología en la que se basa el presente trabajo, se sirvió de la fotogrametría; utilizó la herramienta CMVS/PMVS y Meshlab, mismos que más adelante se describen cómo utilizar. Creó un modelo virtual de un metacarpal I de *Rapator ornitholestoides,* un raptor del Cretácico de Australia depositado en el Museo de Historia Natural de Londres. El modelo permitió la comparación con el metacarpal I de *Australovenator wintonensis*, otro terópodo neovenatórido recientemente encontrado en Australia, modelo también creado a partir de tomografías computarizadas. La conclusión sugiere que los metacarpales I de ambos organismos son suficientemente diferentes para ser asignados como géneros diferentes. Éste es un claro ejemplo de la practicidad de la técnica para comparar especímenes y de las facilidades que brinda para las investigaciones y comparaciones entre dos especímenes localizados en extremos diferentes del mundo.

En cuanto a trabajos en México, se pueden encontrar pocos casos en lo que respecta a la digitalización de fósiles. Gutiérrez-García *et al.* (2013, 2015) han trabajado con un método que permite obtener digitalizaciones de muy buena calidad. Su trabajo se fundamenta en la utilización de franjas de luz proyectadas

sobre el material, de este modo se puede recoger información muy precisa sobre la forma y los detalles de la superficie, además de dar excelentes resultados en muestras pequeñas, como lo demuestran utilizando una mandíbula de ratón. Sin embargo, para una persona con pocos conocimientos sobre la técnica, resulta complicado de entender y aún más de experimentar con su propuesta. El uso de algoritmos y programas matemáticos avanzados dificultan en gran medida el aprovechamiento de sus avances por personas que no pretendan profundizar en el tema.

Materiales para la creación de un modelo 3D

1. Hardware

Son todos aquellos componentes informáticos físicos que ayudarán con la captura y el procesamiento de las imágenes.

1.1 Cámara fotográfica digital

Para la creación de un objeto en 3D a partir de técnicas de fotogrametría no existe en realidad un requerimiento mínimo, sin embargo para obtener resultados de buena calidad para generar material de estudio y para una correcta comparación, se requiere una cámara que proporcione las mejores fotografías posibles, no solamente hablando de la cantidad de Megapíxeles que pueda dar por fotografía, sino también otros factores como los sensores de luz, o la configuración de la cámara, la cual va a variar dependiendo de lugar donde se realice la captura. A pesar de la libertad que da la técnica de elegir la cámara y la configuración que mejor parezca o con la cual se cuente ya, se recomienda ampliamente una cámara superior a los 5 Megapíxeles, la cual, dependiendo del tamaño del objeto, es capaz dar una calidad aceptable en la textura

NOTA: En las configuraciones de la cámara hay que hacer énfasis en evitar el uso de filtros fotográficos y de retoque ya que éstos modifican los colores de las texturas. Igualmente, se recomienda limitar el uso de cámaras que hagan uso de objetivos Gran Angular, los cuales lleguen a distorsionar la imagen con el llamado "ojo de pez", el cual modifica la perspectiva y las dimensiones del objeto (Figura 3).

Dado lo dinámico de las características, existen personas que han logrado resultados de excelente calidad utilizando la cámara de su Smartphone. Actualmente en el mercado existen algunos que superan ampliamente a cámaras fotográficas.



Figura 3. El uso de cámaras con efecto "Ojo de pez"

1.2 Computadora

La computadora en la cual decida procesa las imágenes necesita cumplir con ciertas características:

Procesador/**CPU**: Dual-Core a 3.0 GHz o superior

Tarjeta de Video/ GPU: 1 Gb o Superior

Memoria RAM: 2 Gb o superior

Los requerimientos anteriores son los que se necesitan para llevar a cabo el proceso fotogramétrico, los cuales en realidad no son difíciles ni costosos de cumplir, pues prácticamente cualquier computadora en el mercado de modelo relativamente reciente los cumple. Una recomendación adicional que puede facilitar el proceso, es la utilización de un monitor de 15" por lo menos, para fines prácticos durante la edición de los objetos, aunque esto es opcional.

2. Software

Constituyen el conjunto de programas computacionales para el procesamiento de las imágenes.

2.1 VisualSFM V0.5.26

Se trata de un programa con interfaz gráfica que usa la estructura de movimiento (Structure From Motion o SFM) para la creación de nubes de puntos en reconstrucciones 3D. Puede ser descargado gratuitamente desde su página oficial (<u>http://ccwu.me/vsfm/index.html</u>). Se encuentra disponible para Windows, Linux y Mac OSX, tanto para 32 como 64-bits. No requiere instalación. Una vez descargado y descomprimidos los archivos es necesario instalar las extensiones

para la reconstrucción densa de la nube (<u>https://github.com/TheFrenchLeaf/CMVS-PMVS/archive/master.zip</u>). El archivo .zip se descomprime utilizando algún programa como Winrar o Winzip.

En la carpeta que se genera al descomprimir, llamada *binariesWin-Linux* se encuentran otras carpetas, de acuerdo al sistema operativo de la computadora que utilice debe abrir la carpeta correcta. Por ejemplo, si utiliza como sistema operativo Windows 64 bits -> *Win64-VS2010*. Copiar todo el contenido de la carpeta, es decir los archivos individuales y no la carpeta en sí, dentro de la carpeta de VisualSFM de modo que, por ejemplo, el archivo *cmvs* esté junto con el *VisualSFM.exe*

2.2 CloudCompare 2.6.1

Es un programa gratuito para el procesamiento de nubes de puntos y mallas. El cuál será útil para procesar las nubes de puntos que se generarán a partir de las fotografías con *VisualsSFM*. Se puede descargar desde su web oficial (<u>http://www.danielgm.net/cc/</u>) tanto para Windows como para Linux y Mac OS no disponible para 32-bits en éstos últimos dos. Su uso no es absolutamente necesario, sin embargo, presenta ciertas ventajas al momento de recortar nubes de puntos, en comparación con su contraparte MeshLab.

2.3 MeshLab V1.3.3

Programa **Open source**, para manejo de nube de puntos y mallas, muy similar a CloudCompare, se utilizará principalmente para la creación de la malla y la textura. Disponible tanto para Windows como para Mac OSX y Linux. puede descargarse desde su web oficial (<u>http://meshlab.sourceforge.net/</u>). Como se verá más adelante, se sugiere utilizar CloudCompare para las nubes de puntos y MeshLab para la generación de la malla y la textura.

2.4 Burst Camera

En caso de que se opte por utilizar una cámara fotográfica de teléfono celular que funcione con sistema operativo Android, se recomienda ampliamente esta aplicación, la cual permite tomar gran cantidad de fotografías a modo de "ráfaga" lo cual facilita la tarea al momento de la captura. Disponible para su descarga gratuita desde Google Play

(https://play.google.com/store/apps/details?id=com.samgak.gonnycam)

3. Elementos complementarios (opcionales)

Se trata de todos aquellos elementos que, aunque no son absolutamente necesarios, brindan grandes servicios y facilitaran el proceso del modelado.

3.1 Fondo

Durante los últimos años la industria del cine ha sorprendido con sus efectos realistas y animaciones, las cuales en ocasiones son difíciles de discernir de los objetos "reales". Para esto se valen de una gran cantidad de elementos, sin embargo, una variante que ha tomado peso es el uso de *Croma, Croma key* o *inserción de croma,* comúnmente conocido como "fondo verde" (Figura 5). Se trata de utilizar un fondo de un color lo suficientemente contrastante con el objeto principal, para que en el procesamiento posterior sea fácilmente detectado y eliminado. Generalmente en el cine se utilizan fondos azules o verdes, sin embargo, en este caso se está tratando con huesos o fósiles, por lo que el fondo en color verde contrasta mejor con el color que generalmente presentan los fósiles. Además, facilita la edición porque evita la presencia de

"ruido" al momento de generar la nube de puntos a partir de las fotografías; es decir, cualquier objeto ajeno al fósil que pueda interpretarse como parte del objeto a modelar.

3.2 Iluminación

Para obtener un mejor resultado, es necesario contar con una correcta iluminación del objeto en cuestión. El uso de flash puede ser de gran ayuda, pero es necesario tener cuidado con su utilización. En el caso de superficies muy pulidas o que presenten cierto "reflejo" es necesario abstenerse en la medida que sea posible, pues al momento de aplicar la textura al objeto podrían perderse algunos detalles de la superficie que refleje la luz del flash. Generalmente la luz natural resulta suficiente para obtener buenos resultados.

Creación del modelo 3D

Para la creación de un objeto 3D es necesario trabajar con varios tipos de archivos y elementos los cuales a grandes rasgos son: Fotografías, nubes de puntos, mallas y texturas. Como se aprecia en el siguiente esquema (Figura 4), estos son los pasos que se siguen durante la generación de un modelo virtual tridimensional. Más adelante se detalla el proceso que se debe realizar en cada punto.



Figura 4. Diagrama de procedimiento para creación de un modelo 3D

Toma de Fotografías

La captura de las fotografías es quizá el paso más importante para la construcción de un modelo 3D. Esto puede compararse con cualquier investigación, ya que en caso de no capturar la información correctamente, todo el proceso que lleve a cabo con la información equivocada o incompleta carecerá de calidad y veracidad.

Como ya se dijo anteriormente, la iluminación correcta del objeto dará una mejor calidad en los detalles que quiera enfocar del modelo, ya que generalmente hay aspectos que requieren ser resaltados (por ejemplo, los dientes en un cráneo).

Área de trabajo:



Figura 5. Uso de Croma o Fondo verde para evitar el "ruido" de elementos no deseados en el modelo, se puede utilizar por ejemplo cartulinas verdes que presentan un color bastante contrastante con la coloración que presenta el hueso.

El primer punto a tomar en cuenta durante la toma de las fotografías es que este método se trata de comparación entre imágenes. Para que VisualSFM realice una correcta comparación entre dos imágenes, éstas deben de ser consecutivas, por lo que la función de "ráfaga" incorporada en algunas cámaras puede ser de gran utilidad. Para la correcta creación del objeto se requiere que entre una imagen y la siguiente exista un 60% de superposición, en otras palabras, el 60% de lo que esté en una imagen debe existir en la siguiente. Por esta razón, 3 o 4 fotografías del objeto en sus diferentes caras no son suficientes para obtener el modelo. A partir de esto surge entonces una pregunta ¿Cuántas fotografías se deben de tomar? En realidad, no existe un número absoluto, todo va a depender directamente del objeto a modelar. Por ejemplo, un hueso largo como una tibia o un fémur, va a requerir menos fotografías que una estructura tan compleja como un cráneo. En un ejemplo tangible, White *et al.* (2013) utilizaron un total de 128 fotografías de 10 Mpx para modelar un metacarpal I de un raptor, el cual medía apenas poco más de 5 cm de largo. Sin embargo, aquí se trataba de un

trabajo de precisión y no se recomienda tomar como base para la creación de un objeto pues cada elemento y nivel de detalle requerido será lo que marcará el número de fotografías requeridas.

La técnica para la correcta toma de fotografías consiste en hacerlo de manera continua. Lo correcto es crear una especie de esfera alrededor del objeto (Figura 6), de manera que todos los ángulos queden cubiertos, y respetar la regla del 60% de superposición. Aquí es donde surge el primer problema ¿cómo capturar la base del objeto? Existen dos maneras de solucionar éste inconveniente. La primera consiste en realizar las fotografías con el objeto sobre una superficie transparente, ya sea de cristal o plástico, la cual permita tener una vista de todos los ángulos (además de permitir el movimiento de la cámara alrededor). El problema con esta técnica es que se dificulta el uso del Croma o fondo verde, el cual juega un papel importante al evitar "ruido" en la generación del modelo. De modo, se aprecia que puede ser necesario más de una persona para la toma de fotografías.

La segunda opción consiste en girar el objeto. Existen varias maneras de girarlo, en este punto cada quien es libre de ingeniarse una manera, ya sea montarlo en una base giratoria o hacerlo simplemente manual, en ambos casos es necesario seguir la regla del 60% de superposición con respecto a la última fotografía tomada antes de girar el objeto, ya que es en ese mismo punto donde después de girarlo debe de continuar. Idealmente se sugiere una base giratoria, sin embargo, puede resultar difícil encontrar una o fabricar una que se adapte a todos los tipos de formas, pesos y tamaños de los fósiles, por lo tanto, el girarlo de manera manual resulta muy útil, rápido y barato.



Figura 6. La captura da fotografías se realizó girando el objeto en primer lugar sobre su eje X (Horizontal), una vez girado por completo se giró sobre su eje Y (vertical) hasta completar todos los ángulos.

Después de probar varias técnicas, se puede apreciar cómo los resultados varían en función de los ángulos en que se toman las fotografías, se recomienda iniciar con fotografías del objeto completo, si es necesario después se pueden realizar acercamientos a zonas específicas, sin modificar la continuidad entre una foto y otra, de lo contrario el programa interpretará que se trata de un objeto diferente y construirá otra nube para dicho objeto. Es aconsejable que cada parte, cara o sección del elemento aparezca en un mínimo de tres fotografías para mantener un equilibrio entre precisión (teóricamente cuantos más rayos homólogos intersecten en un punto mayor precisión podrá alcanzarse) y el manejo de un número razonable de imágenes y datos. Los puntos a medir pueden ser detalles naturales bien definidos (bordes, espinas, intersecciones de líneas de crecimiento con patrones de color, etc.).

Una vez capturadas las fotografías, éstas deben ser transferidas a la computadora. Es importante que todas ellas sean colocadas en una sola carpeta donde va a trabajar, manteniendo el orden original en que fueron tomadas.

Creación de la nube de puntos con VisualSFM

A El uso del Programa VisualSFM requiere gran parte de los recursos

del sistema, por lo cual es recomendable realizar ésta tarea cuando el equipo no esté ejecutando otros programas que requieran muchos recursos, de igual manera y como precaución se recomienda monitorear las temperaturas del equipo durante el proceso, al menos las primeras ocasiones

La construcción es un proceso realmente fácil y su rapidez será proporcional a la velocidad y potencia de la computadora que se utilice.

Para iniciar el programa es necesario ejecutar el archivo *VisualSFM.exe* que se encuentra en la carpeta que descargó previamente. Una vez iniciado el programa, se podrá ver dos secciones, una es el espacio de trabajo en blanco y la otra una ventana pequeña en la cual se mostrará la lista de tareas que se ejecutan. Se recomienda no cerrar esta ventana en ningún momento, ya que en

ocasiones el programa aparenta congelarse, pero permanece trabajando en segundo plano y es esta ventana la que muestra si se continúa ejecutando o no.

Para empezar a trabajar, seleccione dentro de la barra de menú en la lista de *file* la opción Open + *Multi images* o seleccionando el ícono con la carpeta y el símbolo de "+"

En la nueva ventana que se abrirá, se debe seleccionar la lista de fotografías en las cuales va a trabajar. Para ello, es necesario buscar la carpeta donde las imágenes fueron almacenadas y una vez en ella seleccionar todas. Puede ser con el cursor o con el comando *Ctrl+E*. El programa es capaz de reconocer varios formatos: *.ppm, .pgm y .jpg* siendo este último el más común en cámaras fotográficas.

Una vez seleccionadas, aparentemente no sucede nada; sin embargo, el programa continúa trabajando. Una manera de comprobarlo es dando *clic* en el botón derecho dos veces sobre el espacio en blanco y abrirá una de las imágenes. Si se repite el doble clic, se mostrará como carga la vista previa de todas las imágenes que fueron seleccionadas.

Una vez que todas las imágenes aparezcan en la ventana de tareas del programa, éste mostrará la leyenda:

"Loading image pixel data... done in Xs" Donde X representa el número de segundos que tardó en realizar la tarea (Figura 7).



Una vez que termine de leer las imágenes que fueron seleccionadas, el siguiente paso a realizar es calcular las coincidencias entre las imágenes. Esto se realiza desde el menú *SfM->Pairwise Matching-> Compute missing matches* o desde el ícono en la barra representado con cuatro flechas de colores que

señalan hacia el exterior . Generalmente este es el paso que toma más tiempo al programa, pues durante éste se comparan las imágenes para generar los puntos de la nube. Como resultado, en la misma carpeta se crearán 2 archivos extras por cada imagen, uno en formato *.mat* y el otro en formato *.sift*, los cuales **no deben borrarse** pues a partir de estos se generará la nube.

Una vez terminado el proceso, en la ventana de tareas mostrará la leyenda:

"Compute Missing Pairwise Matching, finished. Totally X seconds used"

Donde X representará el número de segundos que tardó en realizar la tarea.

El siguiente paso consiste en crear la reconstrucción de la nube de puntos. Esto se realiza con la función *Compute 3D reconstrucción* o *Reconstruct sparse,* que se encuentra en el menú *SfM* o en la barra de tareas con el ícono representado por dos flechas de color rojo y azul, respectivamente, (sin el

símbolo "+") . Esta tarea es más rápida que la anterior y además permite ver cómo se va generando la nube. Alrededor de la figura aparecen símbolos que representan las "tomas" o "cámaras"; en otras palabras, los ángulos desde donde la fotografía fue tomada. Conforme cargue un ángulo el programa, éste irá agregando o quitando puntos a la nube. Mientras tanto, el usuario puede girar el objeto mediante *clic* en botón derecho, moverlo con *clic* en botón izquierdo y acercarlo o alejarlo con la rueda o scroll del mouse.

Una vez terminado el proceso, se mostrará en la ventana de tareas la leyenda:

Run full 3D reconstruction, finished. Totally X seconds used

Donde X representará el número total de segundos que tardó en realizar la operación.

Hasta aquí, aparentemente la nube está completa; sin embargo, es necesario realizar una reconstrucción densa de la nube. Esto se realiza con la función *Run Dense reconstruction* o *Reconstruction Dense* desde el menú *SfM* o desde

la barra de tareas, representada por el ícono con las letras *CMVS*. El programa solicitará una ubicación para guardar los resultados y un nombre para el archivo, una vez indicada, comenzará la tarea. Al finalizar se mostrará el mensaje:

Run dense reconstruction, finished. Totally X minutes used

Donde X representará el número total de segundos que tardó en realizar la operación (Figura 8).



Figura 7. Reconstrucción de la nube: los puntos centrales son los obtenidos por la comparación de imágenes, los puntos externos representan las "cámaras" o ángulos desde los cuales fueron tomadas las fotografías, como se puede apreciar, se dio especial enfásis en la parte basar donde se encuntran la mayor cantidad de detalles que pueden resultar útiles en la determinación.

Ya terminada la nube de puntos, es importante asegurarse de que esté completamente representado el objeto. Una nube incompleta dará bastantes problemas más adelante, especialmente si se trata de objetos complejos como lo puede ser un cráneo.

En caso de que la figura se encuentre incompleta o considere que es necesario agregar más fotografías, puede realizarlo dentro de la barra de menú en la lista de file la opción Open + Multi images o seleccionando el ícono con la carpeta y

el símbolo de "+" claspués proceder a realizar los pasos nuevamente, los cuales serán más rápidos que la última vez debido a que ya se procesaron con anterioridad las otras fotografías.

Alternativas en la creación de nubes para computadoras de bajos recursos

Programas como VisualSFM pueden causar el colapso de computadoras de bajos recursos tales como notebooks, para casos como estos, existen alternativas en línea que realizan el proceso en un servidor remoto, por lo que solamente es necesario cargar las fotografías en dicha plataforma y el cómputo de la nube de puntos se realizará a distancia en servidores de altas capacidades para finalmente arrojarnos una nube de puntos terminada. Sin embargo, al utilizar dichas plataformas hay que tener en cuenta el hecho de que perdemos totalmente el control del proceso y la visualización del mismo, por lo que pueden ocurrir casos en los que el servicio en línea realice una interpretación incorrecta o incompleta de la reconstrucción, cuando esto llega a suceder podría dificultarnos el rastrear el error y tendríamos que comenzar de nuevo.

Es necesario para la utilización de dichos servicios el contar con una conexión a internet de alta velocidad para acelerar el proceso, ya que es necesario mandar todo el lote de fotografías, las cuales entre mayor calidad tengan serán más pesadas.

Edición de la nube de puntos

Para la edición y retoque de detalles de la nube de puntos, el programa cuenta con dos opciones: por un lado, MeshLab y por el otro CloudCompare. Si se decide usar MeshLab, se debe seleccionar la opción *Open Project* en el

ícono de carpeta *M*, buscar la carpeta que generó VisualSFM, la cual tiene una terminación en su nombre de *.nvm.cmvs* y seleccionar y abrir el archivo *bundle.rd.out* el cual se localiza dentro de la carpeta *00.*, Posteriormente se pedirá seleccionar las "cámaras"; aunque no son necesarias aún, sí son requisito para continuar, por lo que se debe seleccionar el archivo *list.txt.* Una vez abierto el archivo se mostrará la nube de puntos densa, en la cual se puede ver cierto "ruido" (Figura 9), o dicho de otro modo, puntos que no pertenecen al modelo, por lo cual es necesario eliminarlos. Aquí es donde quizá se requiere más tiempo, dedicación y trabajo manual por parte del usuario, pues en realidad en otros pasos, aunque puedan ser más tardados la computadora realiza el proceso por sí sola.

Para la limpieza de la nube lo primero es centrar el objeto. Para poder hacer la rotación del objeto y colocarlo en el centro de la esfera, hacer doble *clic* con el botón izquierdo del mouse sobre la nube central. Para mayor comodidad, más adelante se puede utilizar el botón central del scroll del mouse para mover la nube y centrarla en el círculo de movimiento. Una vez acomodado el objeto de la manera más conveniente para su edición, se debe seleccionar la

herramienta *Select vertexes*, representada con el ícono . Con el botón izquierdo del mouse y sin soltar se deben seleccionar los puntos que no pertenezcan al objeto. La selección se hace en un plano 2D, por lo que hay que tener cuidado de no eliminar partes del modelo que se encuentren detrás de

puntos a eliminar. Para ello, es necesario girar el objeto en diferentes posiciones y ángulos para lograr eliminar todos esos puntos innecesarios.

CloudCompare, por otro lado, tiene una herramienta mucho más completa para el recortar los puntos de ruido de objeto. En primer lugar, se debe abrir el archivo

desde el ícono de la carpeta E. En la ventana que se abre, se debe escoger el archivo en formato *.ply* que se obtuvo con VisualSFM. Ya abierto el archivo aparece una ventana en la cual no es necesario modificar nada, las opciones por defecto son las que se utilizarán, simplemente seleccionar *Apply*. Ya con el archivo en pantalla, hay que asegurarse sobre qué capa se está trabajando; esto se ve en el cuadro izquierdo de *DB Tree*. Para trabajar sobre el objeto hay que seleccionar la última capa del árbol, es decir, la que muestra

el ícono de la nube^e; aparecerá un cubo alrededor del objeto a editar, además de mostrar las propiedades en el cuadro inferior. Para manipular el objeto el botón izquierdo del mouse lo girará sobre el eje central, mientras que el botón derecho lo moverá de posición en la pantalla.

Para recortar el objeto, se debe utilizar la herramienta *Segment* ³⁶. Una vez seleccionada, aparecerá una pequeña barra de tareas en la esquina superior derecha, todo lo que hay que hacer es dar click en el botón izquierdo sobre el borde que divida los puntos de ruido de los puntos del objeto, cada *click* irá agregando un vértice de un polígono. Todo lo que hay que hacer es contornear el objeto de modo que quede dentro del polígono y una vez concluido el contorno alrededor se da *clic* con el botón derecho para dar por terminado el polígono. Para separar lo que está dentro de lo que está fuera hay dos opciones; si lo que se quiere es quedarse con lo que está **dentro** del polígono, debe seleccionar la opción *Segment In* **(s)**; si, por el contrario, lo que se encuentra **dentro** del polígono es lo que desea eliminar, seleccione *Segmento*

out El proceso, al igual que en MeshLab, se realiza en 2D por lo que hay que tener cuidado de no eliminar lo que se encuentra al fondo, si es que pertenece al modelo. Después de cada corte, la segmentación se pausa y permite girar el modelo; para reactivar el recorte, es importante presionar el

ícono de pausa . Una vez terminado el recorte se debe seleccionar la

figura *para marcar como terminado el recorte. Esto permitirá la creación de una nueva capa en DB Tree. En caso de que se corte por accidente alguna*

parte del modelo, seleccionar parta descartar los cambios hechos. Se recomienda hacer el proceso en etapas y de vez en cuando dar por terminado el recorte para crear la nueva capa. Si por alguna razón hay una equivocación y se descartan los cambios, se descartarán **todos** y el proceso descrito con anterioridad tendrá que comenzar de nuevo. En el panel de capas, aquellas que muestra el *Checkbox* activado, son las que se mostrarán en el área de trabajo; si se desactiva la casilla de la capa ésta no se mostrará.

Cuando se aceptan los cambios en el recorte se mostrará una nueva capa activada y no parecerán cambios aparentemente en el área de trabajo, todo lo que hay que hacer es desactivar la capa anterior que representa a la figura original. Y volver a seleccionar la segunda capa con la figura ya recortada para continuar con el recorte. Para mayor comodidad y si se está completamente seguro de los cambios hechos, se puede eliminar la capa anterior con la figura completa dando *Click derecho* sobre el nombre de la capa y seleccionar *Delete,*

o presionar el ícono



Figura 9. Como se puede ver una vez obtenida la nube densa y abriendo con CloudCompare, se puede ver la gran cantidad de "ruido" presente en la imagen, pero puesto que se utilizó el fondo verde resulta mucho más fácil identificar los puntos que no pertenecen al modelo deseado.

El proceso con CloudCompare es más rápido que con MeshLab porque permite el uso de formas poligonales, en comparación con la forma rectangular que ofrece MeshLab únicamente. Si bien el proceso llega a ser un poco largo y tedioso, sucede sólo al principio, con la práctica el proceso se vuelve más rápido (Figura 10).

Para guardar el archivo, seleccione el ícono de guardar . El formato en el que se guarde el archivo será *.ply* en BINARY, en el caso de MeshLab en la ventana que se abre al momento de seleccionar el ícono de guardar, no hay necesidad de cambiar las opciones, se dejarán las opciones predeterminadas y se guardará en formato *.ply*. Se recomienda poner un nombre que facilite reconocer al modelo ya editado y recortado.



Figura 10. Nube de puntos limpia.

Sugerencia: Se recomienda limpiar el monitor o pantalla ANTES de comenzar a recortar puntos, pequeñas manchas, pixeles muertos o polvo pueden confundirse con partes de la nube de puntos

Creación de la malla

Para realizar esta actividad es necesario repetir los mismos pasos que al abrir

la nube de puntos con MeshLab. Primero se abre un nuevo proyecto con después se seleccionan el archivo *bundle.rd.out* y el archivo *List.txt.* Ya abierto

el modelo, seleccione *Import Mesh* v esta vez se debe escoger la nube de puntos ya recortada y sin ruido que fue editada previamente. Del lado derecho se abrirá el área de capas. Para saber sobre qué capa se está trabajando, hay que asegurarse que ésta esté en color amarillo, ya que en ocasiones vuelve a la capa anterior. De momento la capa del primer modelo, es decir *bundle.rd.out*, con la nube completa no será necesaria, por lo que se puede desactivar su visualización, para esto es necesario desplegar las opciones de capa en el

ícono ">" al lado del nombre de la capa ^(*) y seleccionar el ícono^(*) para desactivar la visualización de dicha capa.

Para continuar con la edición, es necesario seleccionar la capa de la nube limpia. El primer paso después de esto es el cálculo de las normales, esto es, la orientación que recibirá cada uno de los pixeles que se generó durante la creación de la nube de puntos. Para ello, se debe seleccionar desde el menú de *Filters>Normals, curvatures and Orientation>Compute Normals for point sets.* En la nueva ventana de opciones conserve los valores que vienen por default, dejando en *Neighbour num* o *Numero de vecinos* un valor de 10, con esto, el programa tomará como referencia a sus 10 vecinos más cercanos para orientar los puntos. Posteriormente se presiona *Apply* y en la parte inferior se cargará una barra de proceso de color verde; al finalizar sólo se debe cerrar la ventana que se emergió. Una manera de asegurarse de que el proceso se realizó correctamente es hacer visibles los resultados desde el menú *Render>Show Normal/Curvature* y en la nube de puntos se mostrarán unas líneas azules (Figura 11), las cuales en su mayoría deben apuntar al exterior de la nube. En caso contrario, se debe repetir el cálculo de las normales, pero con el valor de *Neighbour num* en 50 o 100. El resultado que muestre la mayor cantidad de normales (líneas azules) que comienzan en un punto y terminan al exterior de la nube, será el cual utilizará para el siguiente paso.

Sugerencia: En éste paso se recomienda guardar el archivo con las normales calculadas y realizar una nueva inspección con CloudCompare debido a que, con la nueva orientación de los pixeles, podrá notar algunos que no eran visibles en sus posiciones anteriores y los cuales ahora se logran identificar que no pertenecen al modelo a reconstruir.



Figura 11. Como se puede ver, una vez calculadas las normales (líneas azules), éstas deben de apuntar hacia afuera del objeto. En éste ejemplo en particular se usó un valor de Neighbour num de 50 ya que con el valor preestablecido de 10, apuntaban hacia adentro del objeto.

Ya con unas normales aceptables, se puede proceder a la reconstrucción. Esto se lleva a cabo desde el menú *Filters>Remeshing, Simplification and Reconstruction>Surface Reconstruction: Poisson.* En la nueva ventana los valores a modificar son los siguientes:

Octree Depth: 10
Solver Divide: 8
Samples per node: 1
Surface offsetting: 1



Figura 82. Construcción de la malla.

Este proceso generalmente es rápido y automáticamente tendrá el objeto sólido (Figura 12). Aquí es donde se podrá apreciar verdaderamente si se realizó un buen trabajo durante la edición de la nube. Si se muestra una figura diferente a lo esperado será necesario cerrar el programa y repetir el proceso de la edición de la nube, revisar si se cometió algún error, como haber eliminado parte del objeto u omitido algún punto de ruido. En cambio, si obtiene una figura que se asemeje en gran medida al objeto original puede continuar con la aplicación de la textura, siempre y cuando la figura obtenida no distorsione partes fundamentales que puedan ser utilizadas como características para la determinación de algún elemento óseo. En este punto es donde la ética y la autocrítica puede ser importante si lo que se pretende es compartir el material con algún fin científico o didáctico.

Aplicación de la textura

Para la aplicación de la textura se deben abrir los archivos *bundle.rd.out* y *List.txt.* Estos son los que darán la textura con base en las fotografías, además en una segunda capa estará la nube ya recortada, ambas nubes, tanto la que se obtiene con el archivo *bundle.rd.out* (nube completa) como la que se generó después de recortar, deben estar superpuestas exactamente una sobre otra, esto se hace automáticamente porque se trata de la misma nube, pero recortada.

En primer lugar, desactive la visibilidad de la primera capa que corresponde a

la nube original (*bundle.rd.out*), presionando el ícono¹¹¹, después asegurase que está trabajando sobre la nube recortada (debe estar en color amarillo).

Seleccione la opción para agregar textura desde el menú *Filters>Texture>Parametrization* + *Texturing from registered rasters*, esto abrirá una nueva ventana de opciones para aplicar la textura, el único parámetro que es necesario modificar en la nueva ventana será activar la casilla *UV stretching,* de modo que la única casilla desmarcada será *Use image alpha weight,* seleccione *Apply* y cargará la textura con base en las fotografías que usó para generar la nube.



Figura 93. Imagen en la que se resaltan los detalles de la textura y huesos posteriores del cráneo.

El proceso es generalmente rápido y no excede el minuto. Una vez montada la textura el trabajo está finalizado (Figura 13), ahora sólo es necesario

seleccionar el ícono de guardar . En la nueva ventana seleccionar un nombre y una ubicación para el archivo de salida el cual estará en formato .*ply* e irá acompañado de la textura en formato *.png,* cuando seleccione *Guardar,* abrirá otra ventana en la cual no es necesario modificar nada, simplemente presionar *Ok.*

Al realizar la aplicación de la textura del modelo tridimensional en ocasiones podemos obtener el error referente a "*non manifold*", se trata de pequeñas zonas en la maya donde ocurrió un error durante la reconstrucción y no quedaron debidamente cerradas u orientadas por ejemplo. Para corregirlo seleccionamos en la barra de menú la opción *Filters > selection > select vertex non manifold edges,* para el caso de que el error nos indique que es referente a vértices o Filters > selection > select vertex non manifold vertices para el caso de error con vértices, una vez seleccionados los ssegmentos con error se mostrarán en color rojo en el modelo, generalmente son pequeños y no muy visibles a simple vista por lo que es necesario buscarlos a detalle sobre la superficie, sin embargo son

tan pequeños generalmente que pueden eliminarse sin afectar la estructura

general del modelo seleccionando las opciones Delete selected vertices para el caso de vértices o Delete selected faces and

vértices Men caso de que el error persista después desde la barra de menú la opción de eliminar vértices seleccionados, la cual está representada con el icono del triángulo rojo:

Una vez eliminados los sectores con errores podemos volver a intentar la aplicación de la textura.

Finalmente quedó guardado el objeto 3D con su textura. Para poder usar la textura simplemente se debe asegurar que ésta se encuentre en la misma carpeta que la malla, a menos que el programa que se utilice para visualizar pida seleccionar una textura, en cuyo caso seleccione el archivo .*png* que obtuvo.

Porte: Algunos programas para realizar análisis de morfometría geométrica pueden tener problemas con archivos que tengan una textura asociada, por ejemplo, Landmark un programa de morfometría geométrica, el cual se cierra al agregar las mallas, por lo tanto en estos casos hay que guardar la malla SIN textura.

Para la creación del modelo de ejemplo se utilizaron un total de 262 fotografías*, las cuales fueron tomadas con un teléfono Samsung GT-I9100 (Galaxy s2) con una resolución de 720X1280 usando la aplicación Burst Camera.

VisualSFM tardó un total de 168.2 minutos en procesar con un uso normal, es decir, mientras se realizaba el proceso se realizaban otras tareas como navegar por internet, redacción en Word...etc, en un equipo con las siguientes características:

SO: Windows 10 Procesador/CPU: AMD Athlon(tm) II X2 250 Procesador (2 CPUs), ~3.0GHz

Tarjeta de video/GPU: NVIDIA GeForce 210

Memoria RAM: 8 Gb

*El número de fotografías no debe ser una referencia ya que varía dependiendo del objeto y que en ésta ocasión por tratarse de un ejemplo y un cráneo en particular se decidió obtener los mayores detalles y precisión posible

X

Escalar a tamaño real

En ocasiones el poder realizar medidas sobre el objeto es de gran utilidad especialmente si se pretende realizar una comparación con un objeto real. Para realizar esta tarea *MeshLab* cuenta con una herramienta de medición

(*Measuring tool*). Para utilizarla, se selecciona la herramienta y se da *click* en el punto donde se desee comenzar la medición y con un segundo *click* el punto donde se termina la medición. Sin embargo, cuando lo realice, notará que la medida no corresponde a la real, por lo tanto, es necesario escalar el objeto a tamaño real.

En primer lugar, es necesario obtener el valor de *Factor de escala*, para saber cuántas veces es más grande el objeto real en relación con el virtual. El método con el cuál se obtiene el valor es simple. Se toman las medidas del objeto real y se comparan con las medidas del objeto virtual mediante una regla de tres para obtener el factor de escala. A continuación, se muestra un ejemplo práctico en el caso de un hueso largo. El largo total del objeto real mide 25.5 cm. Si mide el objeto virtual exactamente de los mismos puntos y en la misma posición que el real, con la herramienta de medición obtendrá un valor generalmente mucho más pequeño, por ejemplo 5.3864. En éste caso tenemos que 5.3864 es el 100% del tamaño del objeto virtual, entonces la pregunta es ¿cuántas veces es más grande el objeto real? Simplemente se debe hacer el cálculo mediante una regla de tres de la siguiente manera:

Valor del objeto real ÷ Valor virtual = Factor de escala

 $25.5 \div 5.3864 = 4.73414525$

Tenemos entonces que para este ejemplo el valor de escala es de 4.73414525, lo que quiere decir que el objeto real es más de 4.73 veces más grande. Considerando los errores de medición real y virtual, es recomendable realizar varias mediciones y generar un promedio ya que al tratarse de una medición en un plano 2D (virtual) puede tener incertidumbre.

Para realizar el escalado en MeshLab, seleccione la herramienta en *Filters>Normals, Curvatures and Orientation>Transform: Scale.* En la nueva ventana que aparece, en las casillas de *X Axis, Y Axis y Z Axis*, se encuentra por default el valor de *1* Indicando que el tamaño es del 100%. Es aquí donde se debe ingresar el valor promedio del factor de escala obtenido a partir de las mediciones; en el caso del ejemplo sería 4.734145, el mismo valor debe ir en las 3 casillas y asegurándose que la opción *Uniform Scaling* esté seleccionada, para que realice un escalado uniforme. Una vez generado el modelo a escala real, es importante guardarlo de la misma manera que se ha hecho anteriormente.

Al tratar de obtener el factor de escala es muy importante realizar las mediciones varias veces para reducir el margen de error, como ya se mencionó, el programa

realiza la medición sobre un objeto de tres dimensiones en una interfaz de dos dimensiones por lo que se puede obtener una interpretación errónea del área que pretendemos medir. La medición sólo permite hacerla sobre el modelo por lo que si seleccionamos como punto de partida o finalización un punto que no pertenece al modelo, no realizará la medición.

Al realizar varias veces el procedimiento podemos obtener valores muy variados por ejemplo en una primer medición sobre el modelo real y el 3D podemos obtener que el modelo real es 3.5 veces más grande que el virtual, sin embargo una segunda medición podemos obtener que sólo es 2.8 veces más grande, en éste caso hipotético tenemos una diferencia de 0.7 veces el tamaño, podrá no parecer demasiado, sin embargo es 1/5 o 0.2 menos que la primer medida que obtuvimos, en otras palabras el 20% menor, un valor de 20% de diferencia debe de considerarse alto si lo que pretendemos es tener una buena precisión para material de investigación. De esto podemos deducir que alguna de las medidas no fue realizada correctamente ya sea en el objeto real o en el virtual. Lo recomendado sería obtener factores de escala con una variación menor al 7% en caso de que tras varios intentos no se consiga, es mejor cambiar los puntos seleccionados para medir y tratar de que los que elijamos sean más precisos y fáciles de distinguir y medir tanto en el modelo 3D como en el objetivo real. Una vez que obtenemos valores de factor de escala que no varían en más de un 7% entre sí, podemos proceder a calcular un promedio y utilizar el promedio como factor de escala en Meshlab.

P→ Nota: Las medidas obtenidas mediante este procedimiento no deben de ser consideradas como absolutas, simplemente se trata de una referencia para realizar comparaciones anatómicas aproximadas.

Una vez que tenemos nuestro modelo a escala real podemos realizar medidas más precisas sobre él e incluso *MeshLab* nos podrá dar información sobre su volumen y superficie desde la opción: *Filters>Quality Measure and Computations>Compute Geometric Measures,* Los datos los podremos ver en la parte inferior de la barra derecha por debajo de nuestras capas de mallas, aquí veremos tanto el volumen de nuestro modelo como el área total de la superficie, éstos datos nos pueden ser de utilidad tanto para la investigación como para la impresión de las réplicas

Conclusiones

Como se puede ver, el resultado no es complicado ni tardado de obtener. Sin embargo, en un principio puede resultar tedioso para quien no se encuentre familiarizado con el uso de este tipo de programas; todo es cuestión de práctica y no toma mucho tiempo el obtener buenos resultados.

El uso de programas de código abierto en conjunto con recursos que son cotidianos (como cámaras fotográficas de teléfonos celulares), resulta ser

bastante económico del cual se pueden obtener grandes beneficios a bajos costos lo cual da gran importancia al uso de esta técnica para la creación de material virtual para docencia e investigación a bajos costos.

PROBLEMA SOLUCIÓN MeshLab se cierra al Asegurarse de que su equipo cumple con los realizar la reconstrucción requerimientos mínimos para su ejecución. de la malla. VisualSFM no genera la Asegurarsede haber instalado las extensiones para la reconstrucción densa y/o que se nube densa (ERROR: the above CMVS command encuentren en la misma carpeta que VisualSFM. failed!). No se muestra el área de Para activar la vista de capas hay que capas en MeshLab. seleccionar desde el menú View>Show Layer Dialog o presionar el ícono. La computadora se apaga Un factor importante a considerar es la cantidad de recursos que consume el VisualSFM, se trata al ejecutar VisualSFM. de un programa que usa gran parte del CPU y la GPU por lo que trabajan bastante. Algunos CPU y GPU's no cuentan con un buen sistema de enfriamiento, por lo tanto, si no está seguro de las capacidades de su computadora se debe de estar pendiente de la temperatura del equipo y prevenir un sobrecalentamiento. Generalmente los sistemas por seguridad se apagan al calentarse, pero en casos extremos pueden dañarse. Para revisar y monitorear la temperatura del equipo existen diversos programas, Se recomienda el uso de HWMonitor. (http://www.cpuid.com/softwares/hwmonitor.html) VisualSFM reconstruye Este es uno de los errores más comunes con nubes incompletas. que se topa el usuario cuando utiliza el programa por primera vez. El problema radica en la secuencia de fotografías. Generalmente el problema es que las fotografías no cumplen con la regla de 60% de traslape o alguna(s) fotografías no son de buena calidad, por lo que el programa interpreta como objetos diferentes y crea varias nubes en lugar de una.

Problemas comunes y sus soluciones

Glosario

Código Abierto/Open Source: Software que permite ver cómo está hecho y qué hace para modificar y/o mejorar. Los desarrolladores de éste tipo de programas deciden hacer pública la manera en la que está hecho su programa para que otros desarrolladores puedan manipularlo y mejorarlo si así lo desean.

CPU: Unidad Central de Procesamiento, hardware de la computadora encargado de interpretar las instrucciones y órdenes de un programa, llamada generalmente el cerebro de la computadora. (ej. Intel Core Duo, AMD Athlon II etc.).

GNU: Sistema operativo de software libre que permite a los usuarios ejecutar, copiarlo, distribuirlo, estudiarlo y mejorarlo.

GPL: Licencia Pública General.

GPU: Unidad de procesamiento gráfico. Coprocesador dedicado al procesamiento de gráficos. La mayoría de las computadoras cuentan con una integrada a través de una llamada tarjeta de video, en muchos casos de gama baja o de limitadas características y potencia, por lo cual puede agregarse como complemento dentro del gabinete de la computadora. En el caso de laptops existen algunas que traen integradas algunas bastante potentes. (Ej. de tarjeta para PC de escritorio Nvidia G210, GTX750ti, AMD R7 250x etc.).

Megapíxel: Unidad que contiene un millón de pixeles.

MeshLab: Programa para el procesamiento de mallas 3D y manejo de datos (<u>http://meshlab.sourceforge.net/</u>).

Pixel: Superficie homogénea más pequeña que compone una imagen digital, que se define por su brillo y color.

Anexo

Ejemplos de huesos virtuales tridimensionales obtenidos con la técnica de fotogrametría, en la cual se utilizó un teléfono con cámara de 8 Megapixeles y una computadora con las siguientes características (Figura 14, 15 y 16):

Procesador/CPU: AMD Athlon(tm) II X2 250 Procesador (2 CPUs), ~3.0GHz

Tarjeta de video/GPU: NVIDIA GeForce 210

Memoria RAM: 8 Gb



Figura 104. Molar dp2 perteneciente al género Mammuthus aportada por el Museo de Paleontología de Guadalajara, Federico A. Solórzano Barreto. Número de catálogo: MPG-R-6055.



Figura 15. Molares de camello aportados por el Museo de Paleontología de Guadalajara, Federico A. Solórzano Barreto. Número de catálogo: MPG-R-2008.



Figura 16. Húmero de *Equus* aportada por el Museo de Paleontología de Guadalajara, Federico A. Solórzano Barreto. Número de catálogo: MPG-R-1655.

Literatura citada

- Albertz, J. 2002. Albrecht Meydenbauer-Pioneer of photogrammetric documentation of the cultural heritage. International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34(5/C7), 19-25.
- Caracuel, J. E., Cardenal, J., & Delgado, J. 2002. Aplicaciones fotogramétricas digitales en el análisis morfométrico de fósiles. Boletín Geológico y Minero, 113(1), 85-95.
- Cunningham, J. A., Rahman, I. A., Lautenschlager, S., Rayfield, E. J., & Donoghue, P. C. 2014. A virtual world of paleontology. Trends in Ecology & Evolution, 29(6), 347-357.
- De la Torre-Cantero, J., Saorín, J. L., Meier, C., Melián-Díaz, D., & Alemán, M. D. D. 2015. Creación de réplicas de patrimonio escultórico mediante reconstrucción 3D e impresoras 3D de bajo coste para uso en entornos educativos. Arte, Individuo y Sociedad, 27(3), 427-444.
- Gutiérrez-García, J. C., Mosiño, J. F., Martínez, A., Gutiérrez-García, T. A., Vázquez-Domínguez, E., & Arroyo-Cabrales, J. 2013. Practical eight-frame algorithms for fringe projection profilometry. Optics Express, 21(1), 903-917.
- Gutiérrez-García, J. C., Gutiérrez-García, T. A., Mosiño, J. F., VázquezDomínguez, E., Martínez, A., & Arroyo-Cabrales, J. 2015. A novel application of the white light/fringe projection duo: recovering high precision 3-D images from fossils for the digital preservation of morphology. Palaeontologia Electronica, 18(2), 1-13.
- Horus, 3D Scanning for everyone. *Guía de post-procesado de la nube de puntos.*
- How 3D models were made. s. f. 3D Museum. Consultado el 12 de agosto de 2016. http://3dmuseum.org/?page_id=241
- Introducing Real 3D Anatomy. 2011. Real 3D Anatomy. University of Bristol. Consultado el 12 de agosto de 2016. <u>http://www.real3danatomy.com/</u>
 Launching the world's first 3D virtual fossil collection. 2013. Joint

Information Systems Committee (JICS). Consultado el 12 de agosto de 2016. <u>https://www.jisc.ac.uk/news/launching-the-worlds-first-3d-virtual-fossilcollection-</u> <u>22-aug-2013</u>

 Otero, I., Ezquerra A., Rodríguez-Solano, R., Martín, L. & Bachiller, I. 2010 Fotogrametria. De OCW UPM - OpenCourseWare de la Universidad Politécnica de Madrid. Consultado el 05 de Agosto de 2015.

http://ocw.upm.es/ingenieriacartografica-geodesica-y-fotogrametria/topografiacartografia-y-

geodesia/contenidos/TEMA_11_FOTOGRAMETRIA_Y_TELEDETECCION/Fot ogrametria.

- Pisa, C., Zeppa, F., & Fangi, G. 2010. Spherical photogrammetry for cultural heritage: san galgano abbey, siena, italy and roman theatre, sabratha, libya. In Proceedings of the second workshop on eHeritage and digital art preservation (pp. 3-6). ACM.
- Rahman, I. A., Adcock, K., & Garwood, R. J. 2012. Virtual fossils: a new resource for science communication in paleontology. Evolution: Education and Outreach, 5(4), 635-641.

- Remondino, F., Rizzi, A., Girardi, S., Petti, F. M., & Avanzini, M. 2010. 3D Ichnology—recovering digital 3D models of dinosaur footprints. The Photogrammetric Record, 25(131), 266-282.
- White, M. A., Falkingham, P. L., Cook, A. G., Hocknull, S. A., & Elliott, D. A. 2013. Morphological comparisons of metacarpal I for Australovenator wintonensis and Rapator ornitholestoides: implications for their taxonomic relationships. Alcheringa: An Australasian Journal of Palaeontology, 37(4), 435441

La fotogrametría es una técnica basada en principios desarrollados hace décadas, sin embargo, con las nuevas tecnologías las técnicas se han diversificado y perfeccionado. Hoy es fácil crear una réplica de un modelo tridimensional virtual sin invertir prácticamente un solo centavo, a pesar de la facilidad, cosa que se puede notar durante la lectura de este manual, muchos investigadores, profesores y alumnos desconocen totalmente las técnicas y los beneficios que estás aportan, entre los que más destacan son:

- La preservación del patrimonio cultural: a través de la creación de réplicas de objetos de alto valor histórico, podemos asegurar copias fieles de la morfología, colores y texturas de estos objetos, con lo cual beneficiamos a las futuras generaciones en caso de la pérdida, destrucción o desgaste de las piezas originales, algo de vital importancia dentro de la paleontología.
- 2. Material didáctico novedoso: Gracias a los modelos virtuales tanto alumnos como maestros se ven beneficiados en cuanto al aprendizaje y entendimiento de la biología, evolución y paleontología, ampliando el panorama de observación ahora puede resultar más fácil entender cosas que las simples fotografías no nos permitían antes, tales como la forma y la profundidad de ciertos objetos. Esto no se restringe a maestros y alumnos, también a museos y visitantes, los cuales pueden tener una experiencia más agradable al poder manipular ya sea una réplica virtual o una réplica exacta impresa en 3D.
- 3. Investigaciones más precisas: ahora los investigadores son capaces de compartir sus resultados y descubrimientos de una nueva manera, no necesitan viajar a otra ciudad para ver un elemento y poder medirlo ya que esta información puede ser generada y compartida por otros investigadores que tengan más fácil acceso al elemento. Además, permiten el realizar análisis de morfometría geométrica utilizando las tres dimensiones reales que tiene el objeto y no sólo las dos dimensiones que proporcionaba la fotografía, con lo cual los resultados obtenidos tienen mayor peso.
- 4. Entretenimiento: Las réplicas incluso pueden utilizarse para la generación de material de entretenimiento, un ejemplo sería con un modelo tridimensional del cuerpo completo de un animal extinto, el cuál sin dificultad se puede animar y crear material para películas, documentales o series animadas. Con la ventaja de que proporcionan una representación más fiel a las generadas actualmente.

- Albertz, J. 2002. Albrecht Meydenbauer-Pioneer of photogrammetric documentation of the cultural heritage. International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34(5/C7), 19-25.
- Caracuel, J. E., Cardenal, J., & Delgado, J. 2002. Aplicaciones fotogramétricas digitales en el análisis morfométrico de fósiles. Boletín Geológico y Minero, 113(1), 85-95.
- Cunningham, J. A., Rahman, I. A., Lautenschlager, S., Rayfield, E. J., & Donoghue, P. C. 2014. A virtual world of paleontology. Trends in Ecology & Evolution, 29(6), 347-357.
- De la Torre-Cantero, J., Saorín, J. L., Meier, C., Melián-Díaz, D., & Alemán, M. D. D. 2015. Creación de réplicas de patrimonio escultórico mediante reconstrucción 3D e impresoras 3D de bajo coste para uso en entornos educativos. Arte, Individuo y Sociedad, 27(3), 427-444.
- Digital Morphology A unique biological visualization library @ DigiMorph.Org. (s. f.). Digimorph. Consultado el 13 de marzo de 2016. http://digimorph.org/aboutdigimorph.phtml
- Fossil launch marked at Cambridge museum. 2013. Cambridge News. Consultado el 13 de marzo de 2016. http://www.cambridge-news.co.uk/Fossillaunchmarked-Cambridge-museum/story-22515090-detail/story.html
- Gutiérrez-García, J. C., Mosiño, J. F., Martínez, A., Gutiérrez-García, T. A., Vázquez-Domínguez, E., & Arroyo-Cabrales, J. 2013. Practical eight-frame algorithms for fringe projection profilometry. Optics Express, 21(1), 903917.
- Gutiérrez-García, J. C., Gutiérrez-García, T. A., Mosiño, J. F., VázquezDomínguez, E., Martínez, A., & Arroyo-Cabrales, J. 2015. A novel application of the white light/fringe projection duo: recovering high precision 3-D images from fossils for the digital preservation of morphology. Palaeontologia Electronica, 18(2), 1-13.
- Horus, 3D Scanning for everyone. s.f. *Guía de post-procesado de la nube de puntos*. Consultado el 05 de agosto del 2015 de https://itbqcom15media.s3.amazonaws.com/prod/resources/manual/Guia_postproce sado_nube_puntos-1436974131.pdf
- Mounier, A., & Lahr, M. M. 2016. Virtual ancestor reconstruction: Revealing the ancestor of modern humans and Neandertals. Journal of Human Evolution, 91, 57-72.
- Otero I., Ezquerra, A., Rodríguez-Solano, R., Martín, L. & Bachiller, I. 2010. Fotogrametria. En Topografía, cartografía y geodesia. De OCW UPM -OpenCourseWare de la Universidad Politécnica de Madrid. Consultado el 05 de agosto del 2015http://ocw.upm.es/ingenieria-cartograficageodesicay-fotogrametria/topografia-cartografia-

ygeodesia/contenidos/TEMA_11_FOTOGRAMETRIA_Y_TELEDETECCIO N

/Fotogrametria.

- Pisa, C., Zeppa, F., & Fangi, G. 2010. Spherical photogrammetry for cultural heritage: san galgano abbey, siena, italy and roman theatre, sabratha, libya. In Proceedings of the second workshop on eHeritage and digital art preservation (pp. 3-6). ACM.
- Project history (n.d.) Consultado el 13 de marzo de 2016, Online repository of fossils, Museum of paleontology, University of Michigan. https://umorf.ummp.lsa.umich.edu/wp/about/project-history/
- Rahman, I. A., Adcock, K., & Garwood, R. J. 2012. Virtual fossils: a new resource for science communication in paleontology. Evolution: Education and Outreach, 5(4), 635-641.
- Remondino, F., Rizzi, A., Girardi, S., Petti, F. M., & Avanzini, M. 2010. 3D Ichnology—recovering digital 3D models of dinosaur footprints. The Photogrammetric Record, 25(131), 266-282.
- White, M. A., Falkingham, P. L., Cook, A. G., Hocknull, S. A., & Elliott, D. A. 2013.
 Morphological comparisons of metacarpal I for Australovenator wintonensis and Rapator ornitholestoides: implications for their taxonomic relationships. Alcheringa: An Australasian Journal of Palaeontology, 37(4), 435-441.

Páginas web de interés

- 3D Museum. <u>http://3dmuseum.org/</u>
- Digimorph, produced by members of the Digital Morphology Group, in conjunction with The University of Texas High-Resolution X-ray Computed Tomography Facility. <u>http://digimorph.org/index.phtml</u>
- GB3D Type Fossils by the British Geological Survey and copyright on the website is with the JISC GB3D Type Fossils Online project partners. <u>http://www.3d-fossils.ac.uk/home.html</u>
- Real 3D Anatomy: all content copyright © University of Bristol & Creative Dimension Software Ltd 2011 <u>http://www.real3danatomy.com/index.html</u>
- UMORF Online Repository of Fossils, Museum Of Paleontology. University of Michigan.: <u>https://umorf.ummp.lsa.umich.edu/wp/</u>

Links al proyecto derivado de este trabajo:

- Blog: Project Animus 3D projectanimus3d.blogspot.com.mx
- Web: Museo Virtual Nacional <u>www.museovirtualnacional.com</u>
- Archivos de ejemplo y para practicar: <u>https://mega.nz/#F!lxg2nA7C!9xP3_0e-MboD3WGQyu36Bg</u>