

Construcción de un modelo digital 3D de piezas precolombinas utilizando escaneo láser

Building a 3D digital model of pre-columbian artwork using laser scanning

Elizabeth Mesa Múnera, Ing., Juan F. Ramírez Salazar, Ing. & John W. Branch Bedoya. PhD
Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín
{emesamun, jframiresa, jwbranch}@unal.edu.co

Recibido para revisión 12 de enero de 2010, aceptado 22 de febrero de 2010, versión final 19 de marzo de 2010

Resumen—La reconstrucción tridimensional de obras de patrimonio cultural ha demostrado en los últimos años un excepcional interés por la comunidad científica y académica. Hoy en día, con los grandes avances en las tecnologías de adquisición de información tridimensional, el objetivo de recrear en la memoria de un computador una representación fiel de un objeto real conservando la mayor cantidad de características físicas, es cada vez más factible. En el presente trabajo se desarrollan todas las etapas de la Reconstrucción Tridimensional, aplicadas a un conjunto de piezas Precolombinas pertenecientes al Museo Universitario de la Universidad de Antioquia, donde además, en el proceso de adquisición se utilizó un equipo de triangulación por láser localizado en el laboratorio AMMI de la Universidad de Alberta, Canadá. En este documento se describen algunos de los trabajos más representativos que se han desarrollado en el área de preservación cultural, también se detallan los pasos realizados para obtener un modelo digital completo de las piezas Precolombinas escaneadas y finalmente se muestran y discuten los resultados obtenidos con la aplicación de la metodología propuesta.

Palabras Clave—Reconstrucción Tridimensional, Patrimonio Cultural, Piezas Precolombinas, Escaneo Láser.

Abstract—In the last years the Three Dimensional Reconstruction of Cultural Heritage Objects has demonstrated to be an exceptional research topic in the scientific and academic field. Nowadays, the goal in which objects are reproduced in a computer memory, keeping its physical characteristics such as dimensions, volume and shape, has been more feasible based on the technological development of acquisition devices. The aim of this paper is to describe a methodology for 3D Reconstruction of Pre-Columbian artwork which belongs to the Museum of the University of Antioquia. To achieve this aim, it was necessary to

use a laser scanner from the AMMI Laboratory at the University of Alberta, Canada. In this article one can see some relevant work done in Cultural Heritage. Later, one can find the detailed steps to get a complete digital model of Pre-Columbian artworks. Finally, it is shown and discussed the research results.

Keywords—Tridimensional Reconstruction, Cultural Heritage, Pre-Columbian Parts, Laser Scanning.

I. INTRODUCCIÓN

El patrimonio cultural son todos aquellos bienes tangibles o intangibles que representan un valor para la identidad de la nación y de los grupos locales dentro de la misma. Estos bienes se encarnan en los diferentes grupos humanos que habitan un territorio y dependen de la cultura a la que pertenecen. Con el paso de los años este patrimonio se transmite de generación en generación y debe ser conocido y conservado por ser una manifestación clara de la relación que ha existido entre el hombre y su entorno. La exposición permanente de estas piezas ha modificado su apariencia, por lo tanto se requieren tomar medidas para la preservación de dichos objetos artísticos e históricos. Una propuesta para la solución de dicho inconveniente es la aplicación de Ingeniería Inversa para la sociedad y el cuidado de las raíces culturales de la humanidad.

La digitalización de piezas Precolombinas permite el cuidado de los objetos originales, evitando el desgaste progresivo de las piezas por la exposición continua a factores diversos como el clima y el contacto con el ambiente. Por otra parte, las obras de arte digitalizadas propician el acceso de mas personas a espacios de cultura, mediante el desarrollo de réplicas de alta fidelidad (lo

que no implica que éstas sean exactas para no incurrir en fraudes) o por medio de la recreación de ambientes virtuales que integren modelos 3D a los que pueden acceder curiosos y estudiosos de todo el mundo.

El principal interés de estos procesos de reconstrucción se centra en la posibilidad de generar modelos virtuales de alta precisión que permitan monitorear el dimensionamiento de las piezas, realizar nuevas esculturas, analizar el trabajo artesanal hecho por nuestros antecesores, documentar la restauración de los objetos y crear museos virtuales.

El propósito principal de este artículo es establecer e implementar una metodología para la Reconstrucción Tridimensional de piezas Precolombinas pertenecientes al Museo Universitario de la Universidad de Antioquia. La metodología implementada consta de siete etapas: Escaneo, Filtrado, Triangulación, Corrección de errores, Registro, Integración y Ajuste de Superficies.

En la Sección II de este documento se presentan los trabajos previos en la preservación del Patrimonio Cultural utilizando métodos de reconstrucción 3D. La Sección III incluye la fundamentación teórica que sirve de referencia para el desarrollo de la metodología propuesta. En la Sección IV de este artículo se describe el método, especificando los equipos y materiales utilizados. En las Secciones V y VI se muestran los resultados obtenidos para un conjunto de piezas Precolombinas y la discusión a partir del trabajo desarrollado, respectivamente. Finalmente en la Sección VII, se plantean las conclusiones para la actual metodología.

II. TRABAJOS PREVIOS

Los primeros pasos en la preservación del Patrimonio Cultural utilizando técnicas de reconstrucción 3D fueron desarrollados en los 80's por el National Research Council of Canada (NRCC) [1][2][4][7][17][18]. Estas investigaciones estuvieron enfocadas a la medición de artefactos para documentación e investigación, al cálculo de precisión en réplicas y a la generación de los modelos digitales para utilizarlos en la fabricación de réplicas. Además en algunos casos se almacenaron propiedades de color, reflectividad y rugosidad para las superficies, utilizando escaneo láser. Posteriormente, se presentaron trabajos similares en esta área de investigación, los más reconocidos fueron: El "Michelangelo Project" [11] y El "Piet Rondanini Project" [3], donde reconstruyeron en ambos casos obras de Arte de Miguel Ángel. Para una de ellas con 7 m de alto, se adquirieron dos billones de puntos y alcanzaron una resolución de 0.5 mm. De igual manera, fueron también reconstruidas digitalmente obras de arte como La Minerva de Arezzo [15], esculturas de Donatello y Giovanni Pisano [12], reliquias del Mausoleo de Qin Shi Huang y del Museo de Guerreros y Caballos de Terracota [20] y partes del Baptisterio de Florencia [14]. Algunos de estos trabajos incluyeron restauración virtual [20] y prototipado rápido [9].

En los últimos años se han reconstruido tridimensionalmente objetos y entornos de gran escala que hacen parte del patrimonio cultural de diferentes naciones. Para lograrlo se han utilizado técnicas de adquisición como la triangulación láser y la fotogrametría [19]. Para el caso particular de preservación de piezas Precolombinas, Hernández y Prieto [10] se enfocaron en el texturizado de las superficies; pero sin profundizar en el proceso de adquisición, registro e integración de las mismas.

Como resultado del estudio en estos trabajos previos, se identificaron algunos problemas relacionados con las técnicas de reconstrucción 3D. Algunos de ellos se presentaron para las siguientes circunstancias:

- Implementación de lógicas complejas
- Refinamiento de técnicas de registro clásicas como "Iterative Closest Point" (ICP) para aplicaciones de superficies de forma libre.
- Desarrollo de sensores que se ajusten a estructuras de gran escala.
- Evolución de técnicas de integración para manejos de gran cantidad de información.
- Corrección de errores en las mallas poligonales generados en el proceso de escaneo.
- Escaneo de superficies con características ópticas complejas, como reflectancia y porosidad.
- Capacidad computacional para el manejo de gran número de datos.
- Registro de información de textura sobre la superficie geométrica tridimensional

Con el incremento en la resolución de los dispositivos de escaneo, el conjunto de datos producido por estos, es cada vez más complejo, alcanzando millones de puntos para un único modelo. Ya que un objeto 3D no puede ser observado desde un solo punto de vista, se hace necesario el escaneo de dichos objetos desde múltiples vistas para combinarlas usando un método de registro, introduciendo anomalías en las regiones de intersección. Aún con todas estas vistas registradas de un mismo objeto, pueden existir problemas de oclusión y reflectancia que pueden causar huecos en la reconstrucción, dejando un modelo incompleto de la superficie. También, los datos escaneados contienen imprecisiones debido a la limitación en la resolución de los equipos sensorados. El ruido puede presentarse como valores atípicos o en forma de pequeñas desviaciones de los puntos muestreados a partir de la superficie real. De esta manera, se requiere un pre-procesamiento para obtener un modelo de superficie válido a partir de un conjunto de medidas físicas, manteniendo las características esenciales del modelo después del paso de suavizado.

El problema de reconstrucción abordado en este artículo, se enfoca a la precisa obtención de una geometría 3D con todas las etapas de registro, integración y ajuste que esto conlleva para superficies con características ópticas complejas (altamente reflectivas). Para solucionar dicho problema hay una fundamentación parcial en una nueva metodología desarrollada

en el trabajo de doctorado de uno de los autores de este documento y se ajusta al caso particular de piezas Precolombinas.

III. PROCESO DE RECONSTRUCCIÓN 3D

La reconstrucción tridimensional busca reproducir en la memoria de un computador objetos reales, manteniendo fielmente sus características físicas como: dimensiones, volumen y forma. Además existen dentro de la visión artificial, una variedad de métodos de reconstrucción cuyo objetivo principal es obtener un algoritmo que sea capaz de realizar la conexión del conjunto de puntos representativos del objeto en forma de elementos de superficie, ya sean triángulos, cuadrados o cualquier otra forma geométrica.

El problema de no tener una adecuada representación y reconstrucción de formas tridimensionales ha recibido una enorme atención en investigaciones de visión en la última década. El interés surge debido a que la teoría de formas podría tener aplicaciones en una amplia variedad de campos, a saber: diseño, automatización de manufactura, mapeo de terrenos, conducción de vehículos, arqueología, restauración de obras de arte, vigilancia, robots inteligentes, entre otros. Pero además de cualquier aplicación práctica, el problema tiene mucho interés matemático y científico.

Los métodos de reconstrucción 3D, son utilizados para convertir una nube de puntos en una representación de superficie. Desafortunadamente, muchos de estos métodos no describen analíticamente el modelo, ya que sólo se utilizan representaciones que aproximan la superficie, como las mallas triangulares o los diagramas de Voronoi. Otras, por el contrario, utilizan funciones implícitas como lo son las funciones de base radial, las cuales aún no son estándares en la industria. Por el contrario, las superficies NURBS, aunque son un estándar en la industria, poseen el inconveniente de no ser aptas para las representaciones de superficies complejas, ya que para su renderizado es necesario de una base cuadrada regular de puntos. Esto es complicado de obtener en modelos complejos, por lo tanto, se hace necesario el desarrollo de métodos robustos que den una descripción analítica del objeto, que manejen eficientemente grandes cantidades de datos y que preserven los detalles finos de la superficie a reconstruir.

En general, el proceso de reconstrucción tridimensional, involucra las etapas conocidas como: adquisición, registro, integración y ajuste, siendo la última etapa, la que proporciona el modelo computacional del objeto representado.

3.1. Etapa de adquisición

La etapa de adquisición consiste en el sensado de la superficie del objeto para un número determinado de vistas o imágenes de rango. Los métodos para digitalizar las formas de objetos 3D

han evolucionado rápidamente en las últimas décadas. La velocidad y precisión de las tecnologías de digitalización deben mucho a los avances en las áreas de ingeniería eléctrica y física, en lo relacionado con la disponibilidad de nuevos componentes, tecnologías y dispositivos, incluyendo el desarrollo de láseres, CCD's y circuitos de alta velocidad de muestreo. Cabe resaltar que los láseres son las fuentes más comunes para los sistemas digitalizadores [16].

3.2. Etapa de registro

El registro es una etapa del proceso de reconstrucción 3D, que consiste en emparentar dos o más imágenes, que pueden ser tomadas en diferentes momentos, desde diferentes sensores o desde diferentes puntos de vista. Dado que una simple vista de rango puede contener únicamente los puntos en la escena que son visibles al sensor, es necesario unir múltiples vistas de rango en un único conjunto de puntos, para obtener el modelo completo de la escena. El registro de múltiples imágenes solapadas consiste en llevar todas las imágenes adquiridas a un sistema de coordenadas común, esto puede crear datos redundantes, los cuales pueden ser integrados en un conjunto de puntos menos denso.

3.3. Etapa de integración

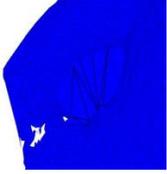
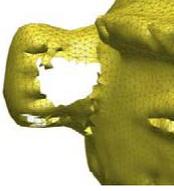
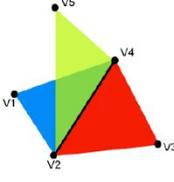
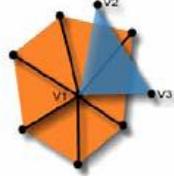
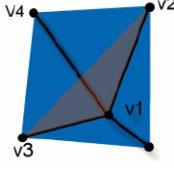
Una vez se han registrado las diferentes imágenes de rango utilizadas para el proceso de reconstrucción, se tiene un conjunto de datos en el espacio 3D cuya conectividad y relación aun no está bien definida. Los datos registrados en la etapa previa generan superficies parciales que poseen huecos, intersecciones poligonales, falsos bordes, entre otros. La integración tiene como objetivo disminuir los datos redundantes y generar datos en regiones con ausencia de información para finalmente obtener una representación computacional suave y continua del objeto.

Los errores topológicos que se pretenden corregir en esta etapa se detallan en la Tabla 1.

3.4. Etapa de ajuste de superficies

El objetivo de esta etapa es brindar la mejor estimación digital de una superficie real descrita por un conjunto conocido de puntos. El ajuste de superficies se concentra en obtener una descripción digital precisa, concisa y aproximada a la superficie real a partir de la utilización de un modelo matemático. Los modelos de superficie pueden tener una variedad de representaciones, entre las más utilizadas se encuentran las mallas triangulares. Las técnicas de creación de mallas pueden producir superficies demasiado densas y pobremente formadas, por lo que generalmente, se aplican técnicas de simplificación de mallas para mejorar el modelo.

Tabla 1. Errores típicos en el proceso de triangulación

	<p><u>Triángulos Agudos:</u> Se presenta cuando los triángulos de las superficies tienen un ángulo muy agudo y dos de sus lados extremadamente largos, por lo que la superficie pierde capacidad de reproducir correctamente la pieza.</p>
	<p><u>Huecos:</u> Los huecos se conocen como zonas en la superficie que no tienen información. Son creados por la eliminación de triángulos erróneos, o en algunas ocasiones por problemas en la etapa de escaneo (dichos problemas pueden ser: baja reflectancia, oclusiones, entre otros).</p>
	<p><u>Caras No-manifold:</u> la topología no-manifold se presenta cuando un lado pertenece a tres o más caras. En términos puramente matemáticos sólo dos caras pueden constituir un lado para ser topología manifold. Sin embargo un lado constituido con una sola cara es considerado como un lado de frontera.</p>
	<p><u>Caras Redundantes:</u> A diferencia de los vértices de frontera, el número de caras y de lados que comparten el mismo vértice deben ser iguales, una cara que viole esta regla es llamada cara redundante.</p>
	<p><u>Caras Cruzadas:</u> Se presenta cuando los lados comparten un vértice interceptándose uno con otro, son llamados geoméricamente incorrectos y sus caras son llamadas caras cruzadas.</p>

IV. RECONSTRUCCION TRIDIMENSIONAL DE PIEZAS PRECOLOMBINAS

En la primera etapa se seleccionaron piezas con diferentes características a nivel de forma, reflectividad, tamaño, textura y complejidad; posteriormente cada pieza fue escaneada obteniéndose diferentes imágenes de rango. La etapa del escaneo de la pieza cumple un papel fundamental en el desarrollo de la reconstrucción, debido a que una mala adquisición de los datos acumula errores que deberán ser corregidos en pasos posteriores, disminuyendo la veracidad del proceso. El escaneo adecuado considera una posición perpendicular del laser respecto a la superficie del objeto, logrando obtener mayor detalle en las rugosidades y oclusiones.

Como primera aproximación, para llevar a cabo la digitalización de las obras precolombinas se utilizó un Escáner Zephyr Kreon 100 (ver Figura 1), el cual tiene una precisión de ± 0.041 mm y permite escanear piezas que se encuentren dentro de un volumen de $150\text{cm} \times 55\text{cm} \times 70\text{cm}$, para piezas de mayor tamaño es necesario realizar diferentes imágenes de rango.

El escáner se compone de un brazo robótico con seis grados de libertad, lo que le permite obtener la posición de cada punto en el espacio respecto a un sistema de coordenadas absoluto con fácil movilidad.

Las metodologías presentadas en los trabajos previos hablan principalmente de cuatro etapas en un proceso de reconstrucción tridimensional, adquisición, registro, integración y ajuste. Sin embargo, con el objeto de ser más descriptivos en el proceso desarrollado, la metodología propuesta se subdivide en siete etapas.



Figura 1. Escáner Zephyr Kreon 100

4.1. Escaneo de la pieza

Inicialmente se sitúa el objeto en una posición que permita obtener la máxima cantidad de información antes de cambiar nuevamente su lugar, todo esto se hace con el fin de preservar el mismo sistema de referencia para las vistas tomadas. Dependiendo de la complejidad en la forma del objeto escaneado es necesario ubicarlo en más de dos posiciones, implicando un posterior registro entre los resultados. En la Figura 2 se muestran los montajes necesarios para obtener toda la información de una de las esculturas reconstruidas con éste escáner.



Figura 2. Montaje de la pieza a escanear

Los objetos fueron escaneados en diferentes posiciones con una densidad de puntos de 0.2 mm utilizando el software Polygonia V15. En todos los casos fueron necesarias dos o más vistas diferentes en cada posición. Se obtuvieron nubes de puntos parcialmente completas de la pieza y aquella información faltante (correspondiente a las zonas ocluidas para determinado punto de vista) se adquirió situando la pieza en una posición diferente.

4.2. Filtrado de puntos redundantes

Considerando que la nube de puntos original tiene una alta densidad de puntos, para procesarla se requeriría una gran demanda computacional, por lo tanto, la aplicación de un filtro busca eliminar datos redundantes en zonas de poca curvatura permitiendo la preservación de características de interés. Además, como resultado del proceso de escaneo se obtienen vistas traslapadas, generándose información redundante en algunas zonas de la superficie. Para corregir dicha redundancia se aplicó un filtro de 0.5 mm que da al conjunto de nubes de puntos una densidad uniforme, manteniendo el detalle en zonas de alta curvatura (ver Figura 3).

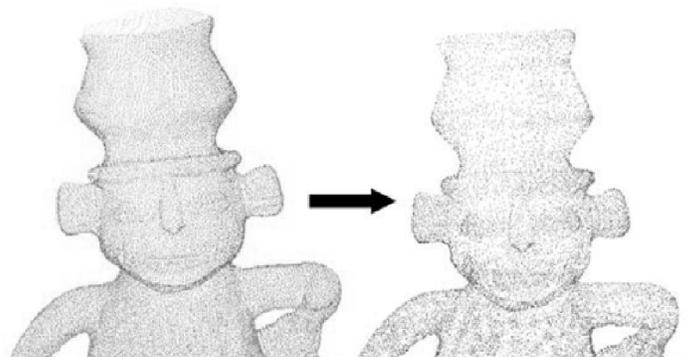


Figura 3. Aplicación del Filtro

4.3. Triangulación de la nube de puntos

El siguiente paso es generar triángulos utilizando como referencia la nube de puntos. Los triángulos se definen de forma tal que los puntos más próximos están conectados entre sí por una arista. Esto implica que los triángulos formados sean lo más regulares posible, es decir, que se maximicen sus ángulos menores y se minimice la longitud de sus lados. El cumplimiento de estas características permite obtener una superficie detallada y suavizada del modelo.

Posteriormente, es necesario repetir las etapas de escaneo para una posición diferente de la pieza e igualmente repetir las etapas de filtrado y triangulación para los nuevos datos adquiridos, teniendo como resultado una nueva malla poligonal con la cual se logrará completar el modelo.

4.4. Corrección de errores en las mallas poligonales

Para el caso de la corrección de huecos en las mallas poligonales se aplicó el método propuesto por J.W. Branch et al [5]. Ellos plantean un método para el llenado de agujeros usando funciones de base radial. El algoritmo comienza localizando los huecos existentes, donde se define la existencia de un hueco

cuando se cumple que al menos una de las aristas no es compartida con otro triángulo. Una vez identificado el hueco, este se clasifica de acuerdo a un umbral y finalmente se llena utilizando funciones de base radial. El diagrama de bloques del algoritmo propuesto en [5] se muestra en la Figura 4.

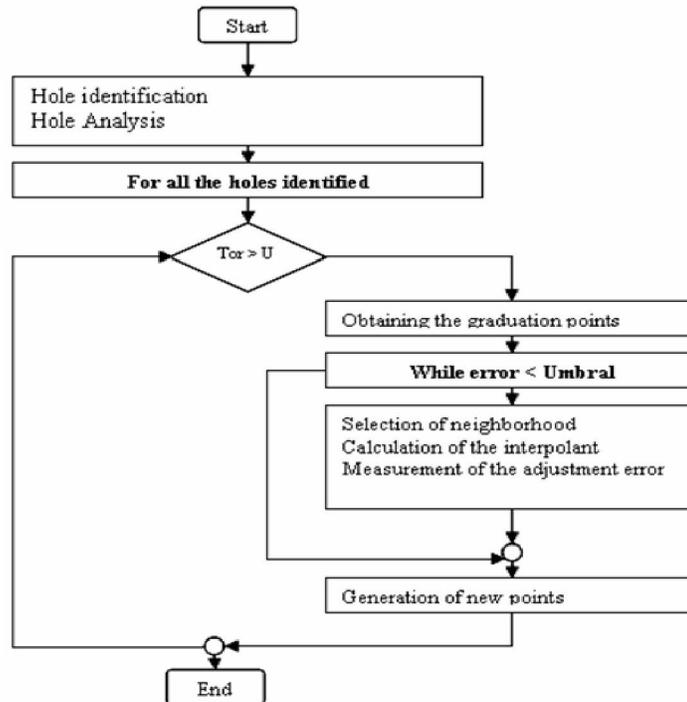


Figura 4. Diagrama de Bloques del Algoritmo

4.5. Registro de mallas poligonales

Luego de tener las mallas poligonales con una topología coherente, se realizó un primer registro seleccionando tres o más puntos significativos y comunes de las dos superficies. La meta es encontrar un conjunto aproximado de transformaciones de registro, sin previo conocimiento de las posiciones espaciales relativas a las vistas, con el fin de realizar un prealineamiento que permita ubicar ambas superficies en posiciones cercanas a un sistema de referencia común. Este tipo de registro se denomina Registro Grueso.

Se realizó nuevamente un registro, pero esta vez seleccionando una región de la superficie; este tipo de registro se denomina Registro Fino y se realiza con el objetivo de refinar el resultado obtenido en el registro grueso. Los mejores métodos que se conocen para registro fino de imágenes son las variantes del algoritmo de iteración de punto más cercano (ICP: Iterative Closest Point). ICP es un procedimiento iterativo que minimiza cada vez el error cuadrado medio, calculado como la suma de las distancias entre puntos en una vista y los puntos más cercanos en la otra vista. Para la etapa de registro “fino” se utilizó método propuesto en [6] y los resultados para una pieza Precolombina se muestran en la Figura 5.



Figura 5. Resultados de los Registro grueso, fino e integración (de izquierda a derecha)

El registro de las mallas poligonales se evaluó al medir la desviación existente entre ellas, con el fin de valorar su exactitud y ajuste. Como resultado se tiene un histograma que muestra una distribución normal de las distancias perpendiculares entre las superficies, para cada punto que la conforma.

En la Figura 6 se observa la medida de desviación tras el registro fino para una de las piezas Precolombinas.

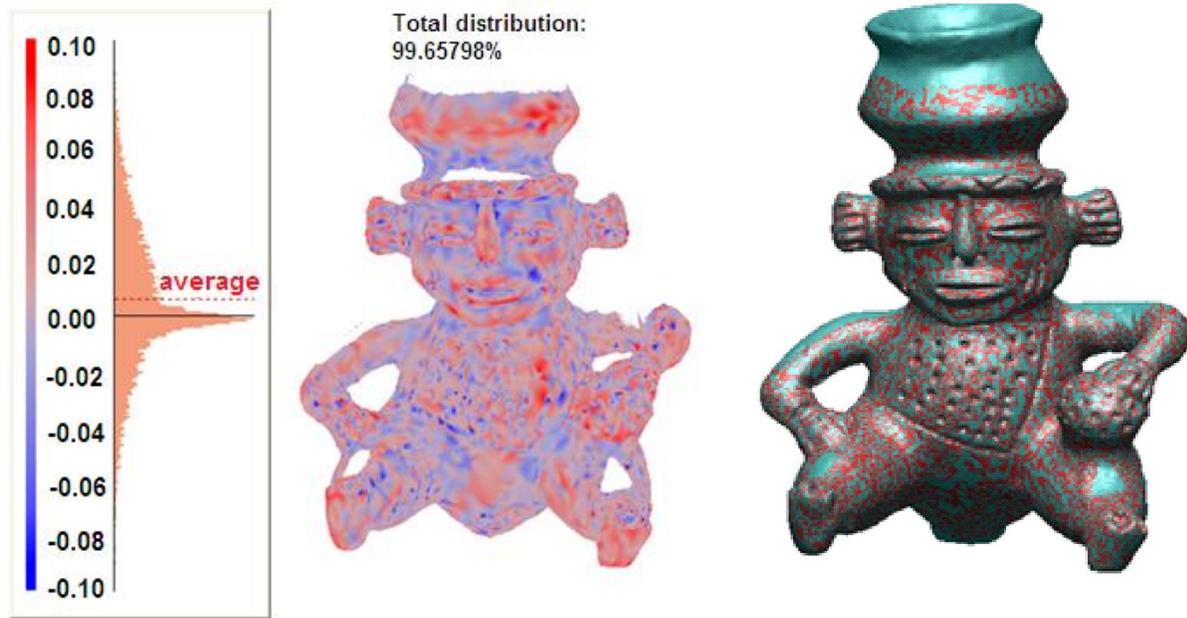


Figura 6. Evaluación de desviación en el Registro

4.6. Integración de las mallas poligonales

A pesar de que en una etapa previa se corrigieron irregularidades en cada una de las imágenes de rango, es necesario una vez se registren las múltiples vistas, integrar la información en las zonas de traslape para corregir huecos, regularizar las regiones de intersección y unificar las imágenes en una única malla poligonal que represente completamente el objeto escaneado (ver Figura 5).

4.7. Ajuste de Superficies

El ajuste de superficies mediante parches NURBS optimizados consiste en tres pasos: cuadrilaterización de la malla triangular, regularización de la malla cuadrilateral obtenida en el paso anterior y finalmente, el tercer paso, corresponde al ajuste mediante parches NURBS (ver Figura 7).

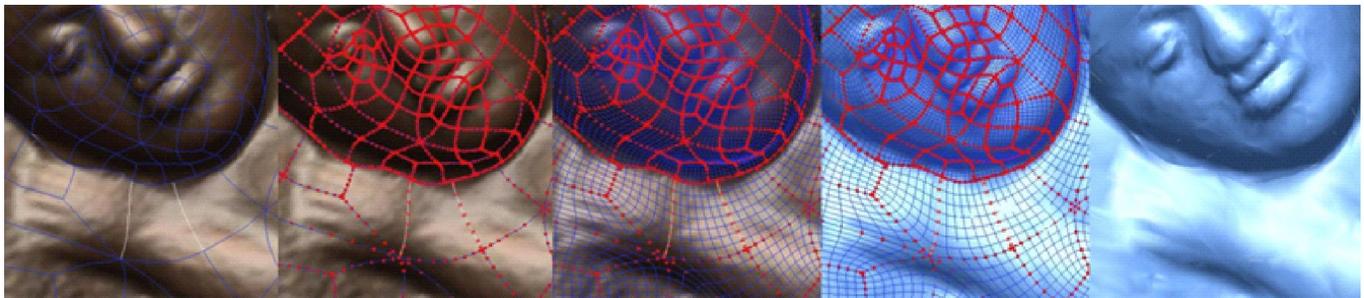


Figura 7. Cuadrilaterización, regularización y ajuste

Finalmente, en la Figura 8 se presenta un gráfico que resume todas las etapas y la secuencia realizada para una de las piezas Precolombinas digitalizadas.

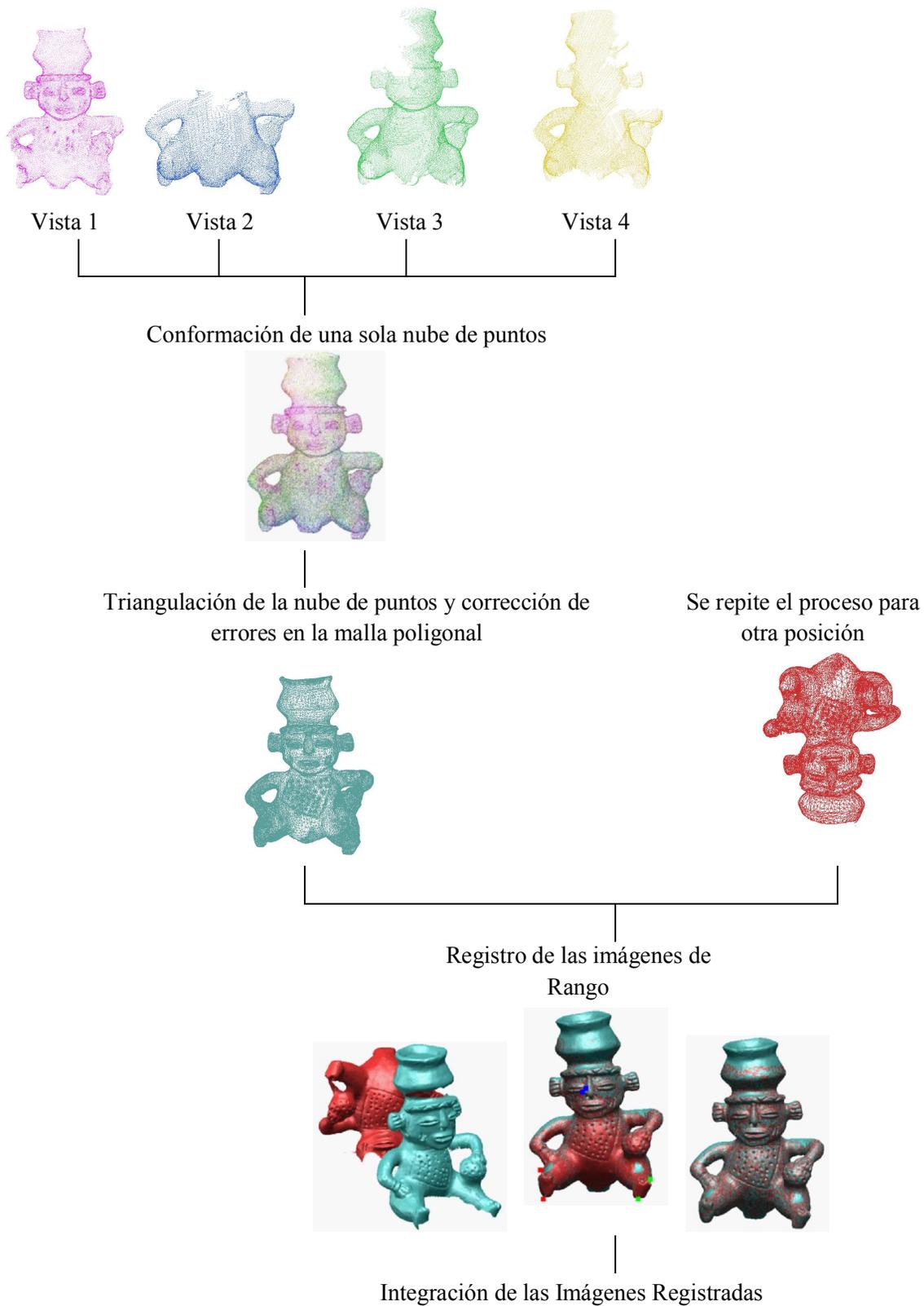


Figura 8. Esquema generalizado del proceso de reconstrucción

V. RESULTADOS

Un grupo de cuatro piezas Precolombinas fué escaneado aplicando el procedimiento previamente descrito. Sin embargo, para algunas de las piezas se hizo necesario realizar ciertas etapas adicionales, ya que su geometría y algunas propiedades como

tipo de material, reflectancia de la superficie y color presentaban varios desafíos.

A continuación, en la Figura 9 se muestran los resultados finales para piezas con características ópticas y geométricas diferentes luego de la aplicación de la metodología propuesta.



Figura 9. Reconstrucciones de otros objetos Precolombinos (izq: pieza original y der: reconstrucción 3D; (a) Pieza especular, (b) Pieza brillante, (c) Pieza brillante y deformable)

El resultado final de este trabajo es la obtención de modelos digitales, que permiten a los curadores de museos exponer las piezas digitales para una visualización interactiva, siendo posible recorrer los contenidos al ritmo propio del observador. Además, para los científicos estos modelos computarizados ofrecen la oportunidad de estudiar y medir artefactos remotamente usando poderosas herramientas de computación.

VI. DISCUSIÓN

- Entre las dificultades encontradas en el proceso de reconstrucción se encuentra la generación de ruido en el momento del escaneo. Esto se hizo evidente para piezas de materiales brillantes (ver Figura 9) lo cual ocasionó la reflexión irregular del haz de luz. La solución a este problema consistió en aplicar un polvo mate especial para crear una capa uniforme sobre la pieza. Sin embargo, el producto aplicado debía ser fácilmente removible y no debía presentar ningún riesgo para la escultura.

- Para el caso en que la pieza a escanear era deformable (ver Figura 9), se presentó un problema en la etapa de adquisición. Según la posición que ésta tomara se deformaba la superficie, modificando las distintas imágenes de rango para cada montaje. La solución a este inconveniente fue suspender la pieza en el aire por medio de un alambre y restringir su movimiento sujetándola de dos puntos adicionales. Esto permitió desplazar el brazo del escáner por toda la pieza, eliminando las zonas oclusas y obteniendo una imagen de rango completa de la pieza.

- Varios trabajos han documentado en detalle el proceso de planeación y reconstrucción tridimensional de objetos patrimoniales. Por ejemplo, Guidi et al [8] detallan la reconstrucción de La Madalena de Donatello y se enfocaron principalmente en la etapa de Registro. A pesar de tener referencias que especifiquen estos métodos, la precisión en los resultados depende en gran medida de las características de la superficie de la pieza, entre otros factores. Por lo tanto, es indispensable analizar independientemente el tipo de objeto a escanear para planear la reconstrucción y obtener

superficies lo suficientemente similares a las piezas originales. Pavlidis et al [13] revisaron en el 2007 los métodos de digitalización 3D aptos para determinada forma, complejidad morfológica y diversidad en los materiales de fabricación de las esculturas.

VII. CONCLUSIONES

La reconstrucción digital de cuatro obras artísticas pertenecientes a una de las colecciones Precolombinas del museo de la Universidad de Antioquia, representa una base para futuros proyectos de investigación orientados a la creación de nuevos espacios de divulgación y difusión de la cultura, como por ejemplo, creación de museos virtuales.

Se obtuvieron modelos digitales, que permiten a los curadores de museos hacerlos disponibles para una visualización interactiva, siendo posible recorrer los contenidos al propio ritmo del observador. Para los científicos, estos modelos computarizados ofrecen la oportunidad de estudiar y medir artefactos remotamente usando poderosas herramientas de computación.

Después de múltiples ensayos se llegó a la conclusión que se obtienen mejores resultados si primero se elimina el ruido en cada vista, luego se realiza el registro de las mallas y finalmente se corrigen los defectos como los agujeros e imperfecciones en las zonas de traslape.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar sus más sinceros agradecimientos a la Dirección de Investigación, Sede Medellín (DIME) por su financiación para el desarrollo del presente proyecto. Igualmente, agradecen al Museo Universitario de la Universidad de Antioquia por su disposición y colaboración con las obras Precolombinas existentes en el Museo.

REFERENCIAS

[1] Baribeau, R., Courmoyer, L., Godin, G., and Rioux, M. Color three-dimensional modeling of museum objects. In *Imaging the Past, Electronic Imaging and Computer Graphics in Museum and Archaeology*, London, U.K., 1996, Occasional Paper Number 114, pp. 199–209.

[2] Baribeau, R., Rioux, M., and Godin, G. Recent advances in the use of a laser scanner in the examination of paintings. In *Proc. Restoration '92*, Amsterdam, The Netherlands, 1992, pp. 69–73.

[3] Bernardini, F., Rushmeier, H., Martin, I., Mittleman, J., Taubin, G.: Building a digital model of Michelangelo's Florentine Piet'a. *IEEE Computer Graphics and Applications*. Vol. 22, 2002, pp. 59–67

[4] Boulanger, P., Rioux, M., Taylor, J., and Livingstone, F. Automatic replication and recording of museum artifacts. In *Proc. 12th Int. Symp. Conservation and Restoration of Cultural Property*, Tokyo,

Japan, Sept.–Oct. 29–1, 1988, pp. 131–147.

[5] Branch, J. Prieto, F. and Boulanger, P. Automatic Hole-Filling of Triangular Meshes Using Local Radial Basis Function. In *Proceedings of the Third international Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission (3DPVT'06)*. IEEE Computer Society, Washington, DC, 727-734. June 14 – 16. 2006.

[6] Branch, J. Prieto, F. Boulanger, P. Robust Three-Dimensional Registration of Range Images Using a New Genetic Algorithm. *GMP 2006*, pp. 528-535

[7] Godin, G., Beraldin, J.A., Taylor, J., Courmoyer, L., Rioux, M., El-Hakim, S., Baribeau, R., Blais, F., Boulanger, P., Picard, M., and Domey, J. Active optical 3-D imaging for heritage applications. In *Proc. IEEE Computer Graphics & Applications. Special Issue on Computer Graphics in Art History & Archaeology*, vol. 22, Sept.–Oct. 2002, pp.24–36.

[8] Guidi, G., Beraldin, J.-A., Atzeni, C. High-Accuracy 3-D Modeling of Cultural Heritage: The Digitizing of Donatello's "Maddalena". In *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 13, no. 3, march 2004, pp. 370-380.

[9] Guidi, G., Pieraccini, M., Ciofi, S., Atzeni, C., Beraldin, J.A., and Lazzari, S. Immagini digitali tridimensionali di beni artistici. *Alta Freq.*, vol. 13, no. 2, pp. 30–36, 2001.

[10] Hernández, J., Prieto, F. 3D and Texture Modelling of Precolombian Objects. *Lecture Notes in Computer Science, Advances in Visual Computing*. DOI: 10.1007/11919476_82. Vol. 4291, 2006, pp. 822-830.

[11] Levoy, M., Pulli, K., Curless, B., Rusinkiewicz, S., Koller, D., Pereira, L., Ginzton, M., Anderson, S., Davis, J., Ginsberg, J., Shade, J., Fulk, D. The digital Michelangelo Project: 3D scanning of large statues. In Akeley, K., ed.: *Siggraph 2000, Computer Graphics Proceedings. Annual Conference Series, ACM Press / ACM SIGGRAPH / Addison Wesley Longman (2000)* pp. 131–144

[12] Marco Andreetto, N.B., Cortelazzo, G.M.: Automatic 3-d modeling of textured cultural heritage objects. *IEEE Transactions on Image Processing*. Vol. 13, 2004, pp 354–369.

[13] Pavlidis, G. et al. Methods for 3D digitization of Cultural Heritage. *Journal of Cultural Heritage*. Vol. 8, 2007, pp. 93-98

[14] Pieraccini, M., Guidi, G., Atzeni, C. 3D digitizing of cultural heritage. *J. Cult. Heritage*, vol. 2, 2001, pp. 63-70

[15] Rocchini, C., et al. 3D scanning the Minerva of Arezzo. In *Proc. ICHIM '01*, Sept. 3–7, 2001, pp. 265–272.

[16] Sánchez F. Reconstrucción tridimensional de escenas con iluminación láser: aplicaciones a la fotogrametría industrial. PhD thesis, UPM, 2000.

[17] Taylor, J., Beraldin, J.A., Godin, G., Courmoyer, L., Rioux, M., and Domey, J., "NRC 3D imaging technology for museums & heritage," in *Proc. 1st Int. Workshop on 3D Virtual Heritage*, Geneva, Switzerland, Oct. 2–3, 2002, pp. 70–75.

[18] Taylor, J., Forester, G., Livingstone, F., and Baribeau, R. Amuse: 3-D color imaging, remote access and display. In *Proc. EVA'96*, 1996, pp. 9.1–9.10.

[19] Yastikli, N. Documentation of Cultural Heritage using digital Photogrammetry and Laser scanning. *J. Cult. Heritage*, vol. 8, 2007, pp. 423- 427

[20] Zheng, J.Y., Zhang, Z.L.: Virtual recovery of excavated relics. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1999, pp. 6–11.