

Reconstrucción digital de objetos arqueológicos

Digital reconstruction of archeological objects

German Sanchez T.¹, Esmeide Leal², Nallig Leal.³

¹PhD en Ingeniería. Profesor asistente, Universidad del Magdalena. Santa Marta. Grupo de I+D en nuevas tecnologías de la información y la comunicación GIDTIC. Santa Marta, Colombia

^{2,3}MSc en Ingeniería de sistemas. Profesor titular, Universidad Autónoma del Caribe. Grupo de Investigación en sistemas inteligentes y nuevas tecnologías SINT. Barranquilla, Colombia.

E-mail: {esleal, nleal}@uac.edu.co

Recibido 21/04/14, Aceptado 15/07/2014

Citar como: G.Sanchez, E.Leal, N.Leal, "Digital reconstruction of archeological objects", Prospect, Vol 12, N° 2, 41-48, 2014.

RESUMEN

Diferentes factores afectan los monumentos y objetos que constituyen la herencia cultural de las regiones, entre las causas más comunes se encuentran los efectos ambientales, la exposición prolongada a luz, hongos entre otras. Su conservación es deseable desde la perspectiva de la importancia cultural, por lo anterior, es interesante explorar técnicas basadas en tecnología como un esfuerzo de conservación. Se describe un caso de aplicación de reconstrucción tridimensional de piezas arqueológicas mediante tecnología de adquisición basada en luz estructurada. Se presenta el proceso completo que incluye la adquisición de datos, el preprocesamiento, el registro, la corrección de anomalías y la visualización. Las etapas anteriores fueron realizadas mediante *software* libre con lo que se provee una solución efectiva en costos y precisión. El montaje descrito permite reproducir modelos tridimensionales con precisión sin la necesidad de *software* o *hardware* especializados.

Palabras clave: reconstrucción tridimensional, piezas arqueológicas, objetos culturales.

ABSTRACT

Different factors affect the objects that are considered cultural heritage of the regions, among the most common causes we can find the environmental conditions, long exposure to light, fungi presence, among others. The cultural heritage objects conservation is desirable from the regional cultural importance point of view, therefore, is interesting to explore new technological-based techniques addressed to the conservation. This paper presents an application case of archeological pieces three-dimensional reconstruction using scanner based on structured-light. It describes the whole procedure including the stages of data acquisition, preprocessing, registration, anomalies correction and visualization. These stages were making using open software, thus providing a precise and cost effective solution. The described setup allows to reproduce digitally an accurate three-dimensional model without need specialized software and hardware.

Key words: three-dimensional reconstruction, archaeological finds, cultural objects.

1. INTRODUCCIÓN

La reconstrucción tridimensional de formas ha generado un gran interés en los últimos años por la comunidad científica debido a su variedad de aplicaciones en diferentes campos. Sin embargo, los métodos propuestos son aún limitados en su aplicación, es decir, se han generado métodos con alta precisión en sus resultados, pero limitados en generalidad. Sin embargo, reconstruir digitalmente ob-

jetos ha permitido su utilización en una amplia gama de áreas del conocimiento debido a los grandes avances tecnológicos para adquirir información tridimensional.

Diferentes factores afectan los monumentos y objetos que constituyen la herencia cultural de las regiones, entre las causas más comunes se encuentran los efectos ambientales, la exposición prolongada a luz, la presencia de hongos, entre otras [1]. La reconstrucción 3D ha tenido un

desarrollo significativo en el campo de la preservación de objetos y ambientes arqueológicos, debido a que constituye una técnica alternativa, basada en tecnología, para conservación de dichos objetos.

En [2] se describe un modelo digital 3D para la reconstrucción de objetos usando escaneo láser. Este modelo fue obtenido a partir de un proceso de reconstrucción tridimensional de cinco etapas que son: el escaneo de la pieza, registro, integración, ajuste de superficies y la aplicación de texturas. Metodología que fue aplicada a un grupo de diferentes piezas. Otras aplicaciones previas realizadas fueron la reconstrucción digital de obras Stećak [3], Virgen de Pietranico [4] y un grupo de tumbas imperiales [5]. Otros trabajos similares incluyen a [6], [7].

Debido a la mejora en los últimos años que ha tenido la tecnología asociada al proceso de adquisición la calidad de las aplicaciones de reconstrucción han ido creciendo mostrando en sus resultados una mayor capacidad de representación gráfica y una aproximación más real de las piezas o escenarios reconstruidos. La adquisición puede realizarse a través de diversas técnicas, con una amplia gama de *hardware* de diferentes niveles de precisión. Estas técnicas se dividen en dos grandes grupos dependiendo del método de adquisición a usar: métodos con y sin contacto, de acuerdo con la interacción del *hardware* con el objeto. En este contexto, dada la importancia de las piezas tratadas es deseable una metodología de adquisición basada en técnicas no invasivas o sin contacto. Por lo anterior la metodología presentada utiliza una técnica de adquisición sin contacto basada en la proyección de patrones de luz sobre el objeto.

En este trabajo se describe una metodología para realizar la reconstrucción de objetos cerámicos arqueológicos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología utilizada fue construida teniendo en cuenta los siguientes objetivos, siguiendo las consideraciones realizadas en [8]:

- Construcción simple
- Adquisición rápida de datos
- Fácilmente reproducible
- Capaz de reproducir modelo 3D de alta precisión
- Capacidad de corregir anomalías relacionadas con ausencia de información

Para esto se usó un procedimiento común de ingeniería inversa que permite obtener la información geométrica de los objetos y los aspectos decorativos como los presentes en las texturas. En general, el procedimiento destaca dos líneas independientes para obtener estos aspectos, una orientada a la adquisición de información tridimensional y otra direccionada a la adquisición de texturas.

El proceso inicia con la adquisición de información tridimensional mediante un montaje basado en la proyección de patrones de luz estructurada que genera un conjunto de puntos tridimensionales que representan una vista parcial del objeto. Para generar un modelo 3D completo del objeto se requiere adquirir diferentes vistas parciales. Éstas están desconectadas y contienen alguna medida de ruido incorporado por la naturaleza del método de adquisición. Por lo anterior una etapa de filtrado y registro de imágenes es aplicada. El registro de imágenes hace referencia a los procedimientos matemáticos para inferir la alineación correcta de las vistas. Finalmente, se fusionan las vistas y se recuperan las anomalías generadas por oclusiones o zonas de sensado difícil. La aplicación de las etapas anteriores permite reproducir digitalmente la geometría de los objetos. Sin embargo, una reproducción completa debe incorporar la información de la textura presente en la superficie de éstos, para esto se adquieren fotografías digitales del objeto en la misma posición de la adquisición de los datos tridimensionales, a cada fotografía se le aplica un procedimiento de corrección de color para finalmente realizar un mapeo de textura sobre la representación digital del modelo 3D. La Figura 1 muestra la metodología aplicada.

Un aspecto importante a tener en cuenta cuando se realiza la adquisición mediante emisión de luz, está relacionado con la respuesta óptica del material. Según la caracterización del material se clasifica la complejidad o la dificultad de la adquisición mediante medios ópticos [9], siendo los materiales opacos los menos complejos y los mixto los más complejos de adquirir (ver Tabla 1). Los objetos tratados se encuentran en la categoría denominada Opacos.

Figura 1. Diagrama de la metodología propuesta.
Figure 1. Proposed methodology diagram.



Fuente: Elaboración propia.

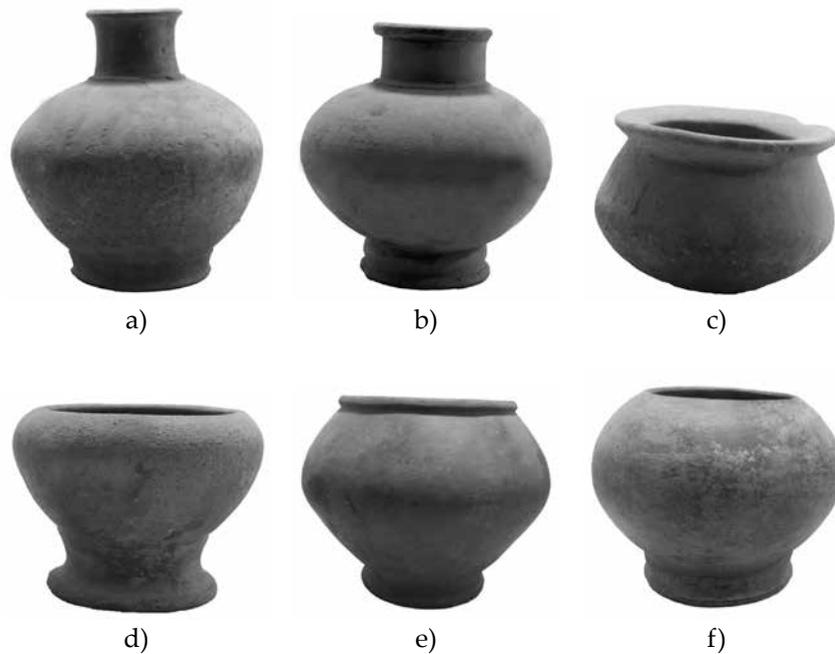
2.1. Conjunto de imágenes

El conjunto de objetos está compuesto principalmente por vasijas de diferentes formas geométricas, caracterizadas por poseer una geometría suave, con superficie predominantemente opaca. Estos objetos son característicos de las tribus indígenas de la región Caribe colombiana. La figura 2 muestra algunos ejemplos del banco de objetos utilizados para probar la metodología propuesta.

El sistema de adquisición es formado por un proyector de vídeo y una cámara usando el *software* David Scanner. La cámara y el proyector están localizados de frente al objeto que se desea adquirir. El funcionamiento del método de adquisición está basado en la proyección de un patrón de luz estructurada calibrado de acuerdo con unos patrones preestablecidos. La Figura

Figura 2. Ejemplos de objetos de prueba.

Figure 2. Testing objects samples.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1. Caracterización óptica de los objetos cerámicos.

Table 1. Optical characterization of ceramic objects.

Tipo de Objeto	Tipo de volumen	Formación de imágenes
Opaco	Áspero	Reflectancia difusa o cercana
	Brillante	Reflectancia mixta difusa y especular
Translucidos y/o Transparentes	Suave	Reflectancia especular ideal o cercana
	Dispersa por regiones	Dispersión múltiple

Captura de vistas

3 muestra gráficamente la disposición de los elementos del montaje.

Las características de precisión, resolución del escáner están descritas en la Tabla 2.

2.2 Filtrado de vistas y registro

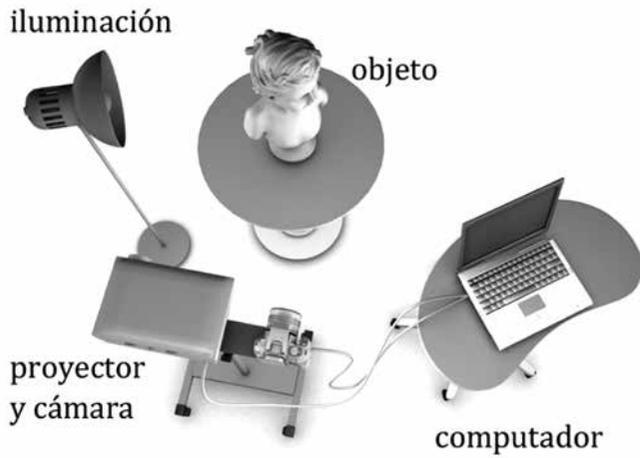
Los valores atípicos pueden afectar significativamente la precisión de la estimación de las medidas de la nube de puntos como el vector Normal, por lo tanto, es deseable un procedimiento para detectarlos y eliminarlos del conjunto de datos. Para la detección de dichos valores atípicos se utilizó la Distancia Mahalanobis (DM). La DM tiene en cuenta la varianza de los datos y por lo tanto mide la dispersión de los datos respecto a la media. Para una muestra de datos multivariada n-dimensional, la Distancia Mahalanobis se define como:

Tabla 2. Especificaciones técnicas del montaje de adquisición.

Table 2. Technical specifications of the acquisition assembly.

Tamaño de objeto- Área de trabajo	300- o más (mm)	90-300(mm)
Precisión	0.1	0.05
Resolución de escáner	0.6	0.2

Figura 3. Montaje de adquisición de datos.

Figure 3. Data acquisition assembly.


Fuente: Elaboración propia.

$$DM(p_i) = (p_i - \bar{p}_w)^T CM_w^{-1} (p_i - \bar{p}_w) \quad (1)$$

Donde CM_w^{-1} es la matriz pesada de la covarianza inversa del vecindario del punto p_i y \bar{p}_w es la media pesada. Para datos multivariados distribuidos normalmente, los valores de DM^2 se distribuyen aproximadamente como una ji-Cuadrada con n -grados de libertad (χ_n^2). Esto es, configurando DM^2 a una constante dada con un cierto cuartil de χ_n^2 . Se pueden considerar como valores atípicos, aquellos cuya DM a la media del vecindario está por fuera en un intervalo de confianza $\chi_{n;1-\alpha}^2$. Es decir, $DM(p_i) > \chi_{p;1-\alpha}^2$, lo que constituye un método de detección de valores atípicos multivariado incluyendo la matriz de covarianzas estimada de forma robusta CM_w descrita en la ecuación (1), mejorando así la estimación de $DM(p_i)$.

Debido a la característica parcial de las vistas obtenidas y teniendo en cuenta el hecho que posterior a cada adquisición el sistema geométrico de referencia cambia (ver Figura 4a), es necesario alinear las vistas o registrarlas. La redundancia de información suele estar inmersa en el proceso de adquisición parcial. Diferentes métodos han sido propuestos para tal fin. En general, estos métodos se basan

en la información redundante o regiones de solapamiento entre vista para estimar métricas de similitud y determinar el correcto emparentamiento de éstas. De hecho, un solapamiento suficiente de las diferentes vistas se requiere en el proceso de registro. Sin embargo, sólo es requerido para este fin. Luego de la alineación de las vistas, el exceso de información suele suponer un costo computacional innecesario en el tratamiento de los datos en etapas posteriores, por lo que es eliminada en la etapa de fusión de vistas. La Figura 4b ejemplifica el resultado del registro.

2.3 Fusión y corrección de huecos

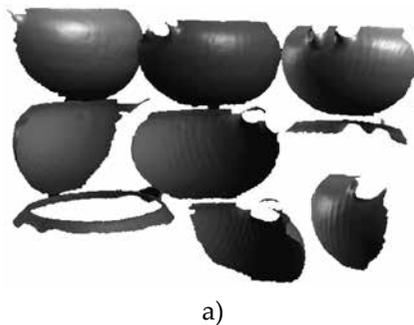
Posterior al proceso de registro las imágenes son fusionadas en un conjunto único de puntos (ver Figura 4c). Es común encontrar regiones en las cuales no fue posible adquirir información por lo que forman zonas sin información que se representan visualmente mediante una discontinuidad denominada Hueco, se utilizó el *software* MeshLab (3D-CoForm) para realizar esta fusión.

El proceso para la reparación de huecos inicia con la detección del contorno, una triangulación inicial al interior de éste y un posterior refinamiento de los vértices basados en la estimación de la curvatura. Para la triangulación inicial fue aplicado el método de triangulación denominado Avance Frontal (*Advancing front method*) [10]. El Método de Avance Frontal tiene la propiedad de cerrar una discontinuidad agregando triángulos y vértices de triángulos de acuerdo con una densidad definida. El inconveniente de esta técnica es que genera una triangulación de naturaleza plana. Para recuperar la forma de este segmento se optimiza la posición de los vértices agregados mediante un modelo basado en curvaturas. Este modelo es estimado sobre un vecindario seleccionado alrededor de cada vértice del contorno.

La selección de vecindarios en mallas triangulares es un procedimiento directo. Diferentes trabajos describen técnicas para la obtención del grupo de vértices vecinos de un vértice sobre una malla triangular. Este procedimiento puede ser descrito como: Dada una malla $M = \langle V; A; T \rangle$ compuesta por vértices, aristas y caras, en donde cada cara está formada por un triángulo, una arista en M conecta dos vértices v_i y v_j . Para un vértice v_i , el conjunto de vértices que conforman el vecindario del primer anillo (1-ring) denotado por $Neig1(v_i)$, son todos los v_k , tal que existe una arista a_{ik} . El inconveniente del enfoque anterior es la estrecha dependencia de la información topológica de los datos, es decir, su conectividad. Un enfoque inspirado en los vecindarios de anillo que puede operar igualmente sobre puntos, consiste en escoger los vértices que se encuentran dentro un radio predefinido r . Gráficamente este procedimiento se muestra en la Figura 5.

Figura 4. a) Vistas parciales, b) registro y c) fusión de las vistas.

Figure 4. a) Partial views, b) registration result y c) merge result.



a)



b)



c)

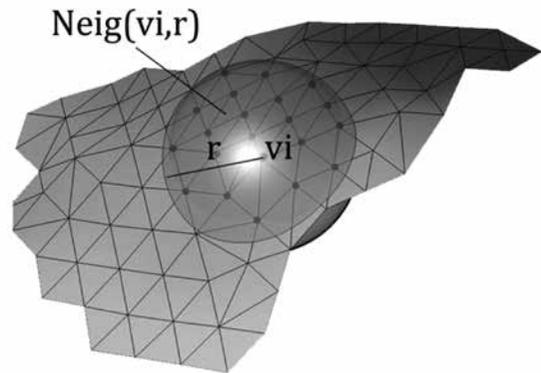
Fuente: Elaboración propia.

Debido a que el contorno lo conforman un conjunto de vértices, el procedimiento de selección del vecindario de un contorno está dado por el conjunto de puntos que resulta de estimar el vecindario radial en cada uno de los vértices del contorno. La Figura 6, muestra el resultado de seleccionar el vecindario de un contorno.

Así, dado un contorno se establece un vecindario alrededor del contorno, con los cuales se estiman las modificaciones al interior del hueco. La Figura 7, ilustra el procedimiento de reparación de un hueco en el modelo tridimensional.

Figura 5. Vecindario definido por la esfera de radio centrada en .

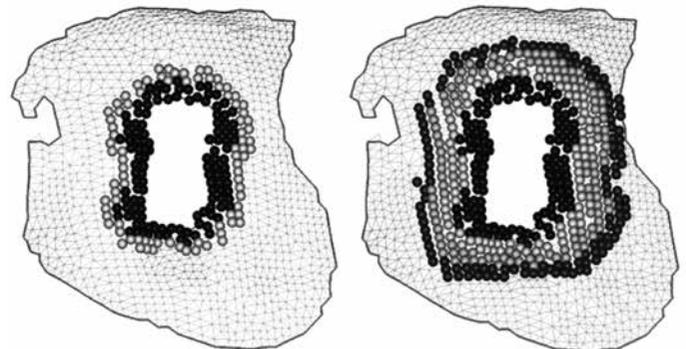
Figure 5. Spherical -radius neighborhood centered on vertex.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Ejemplo de vecindarios mediante la variación del tamaño del radio.

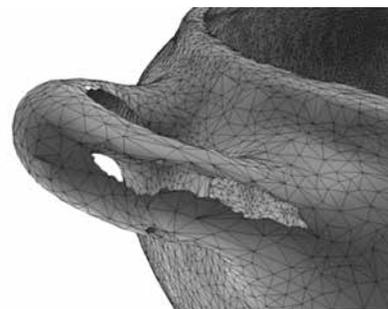
Figure 6. Neighborhood samples varying sphere radius size.



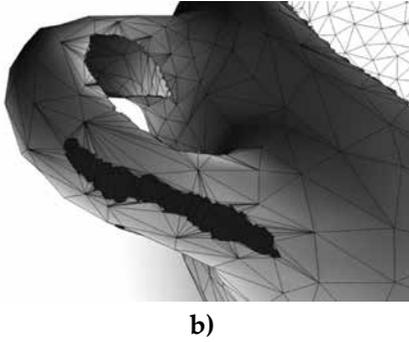
Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Ejemplo de reparación de modelos 3D, a) presencia de huecos y b) generación de triángulos y llenado de huecos.

Figure 7. Sample of repairing 3D models, a) hole presence y b) triangles generation and hole filling.



a)



Fuente: Elaboración propia.

3. TEXTURIZADO

Los modelos tridimensionales obtenidos mediante sistemas de luz activa, como los sensores basados en patrones de luz estructurada, están direccionados principalmente a la reproducción de la información geométrica, esto es, la recuperación de la forma de los objetos. Un paso adicional que incorpora realismo al modelo final es la adición de la información de textura.

El proceso de aplicación de texturas inicia con la adquisición de información de color mediante imágenes de intensidad de color que son adquiridas mediante cámaras fotográficas tradicionales. Por supuesto, que en este contexto, el nivel de realismo de la textura es dependiente de la calidad de la cámara y del sistema de iluminación. Sin embargo, el proceso es sensible a pequeños cambios en la iluminación de las imágenes, por ésta razón en algunos casos es necesario realizar un proceso adicional de corrección de color.

La corrección de color en imágenes es necesaria debido a que los objetos podrían alterar su posición en el espacio de color causado por las variaciones de la intensidad de la luz. Las características de color de una imagen adquirida mediante una cámara dependen de tres factores, a saber, el contenido de la escena adquirida, la iluminación incidente y las características del dispositivo de adquisición, estos últimos factores afectan directamente la representación del color de los objetos.

En un modelo ideal la formación de la imagen es descrita así [11]:

$$p_k^x = \int_w E(\lambda) S^k(\lambda) R^k(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

Donde, p_k^x es la respuesta del sensor k en el $pixel$ x . $E(\lambda)$ es la distribución espectral de la potencia de la iluminación incidente, $S^k(\lambda)$ la función de reflectancia de la superficie,

$R^k(\lambda)$ es la sensibilidad de la cámara a la longitud de onda λ del espectro visible w .

El objetivo de la corrección de color es reconstruir la información de color considerando que ésta procede de una fuente de luz uniforme. En este contexto, el problema mal condicionado en el sentido en que es dificultoso obtener una referencia correcta de color desconociendo la iluminación [12].

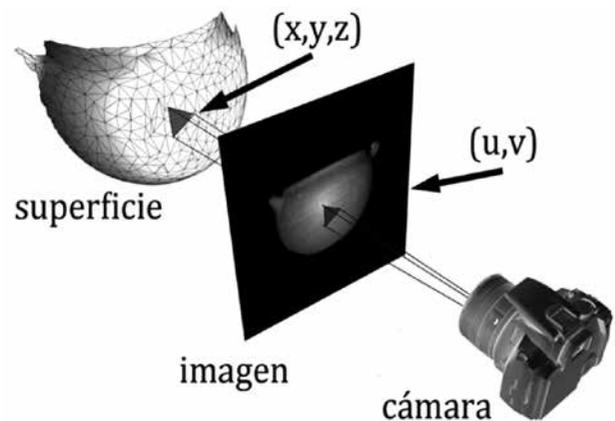
Se aplicó un algoritmo de corrección de color denominado *Gray World* [13].

Finalmente, se aplica un proceso denominado mapeo de texturas. En este proceso para cada vértice del modelo tridimensional se necesitan las coordenadas correspondientes en la imagen de textura, así, las imágenes sobre las cuales el vértice es apreciable desde un ángulo apropiado son las que se toman como referencia para la información de textura para dicho vértice. Generalmente, este ángulo hace referencia a un sistema ortogonal [14]. Este modelo es denominado Modelo de Perspectiva (ver 8) que permite proyectar un vértice 3D (x_i, y_i, z_i) sobre su punto correspondiente en el espacio 2D (u_i, v_i) , en la imagen de textura, así:

$$\lambda \begin{pmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{pmatrix} = p_r \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Figura 8. Modelo de proyección de textura.

Figure 8. Texture projection model.



Fuente: Modificada de [15].

Con $(x_i, y_i, z_i, 1)^T$ es la coordenada del vértice i de la superficie 3D, es la matriz de proyección de la imagen de referencia, y $(u_i, v_i, 1)^T$ es el punto de proyección calculado. Detalles de la implementación pueden encontrarse en [15].

4. RESULTADOS

Diferentes objetos fueron digitalizados mediante la metodología propuesta. El objetivo fue analizar la precisión, el costo computacional y el análisis de los modelos finales

obtenidos con el propósito del desarrollo de sistemas de museo de naturaleza virtual.

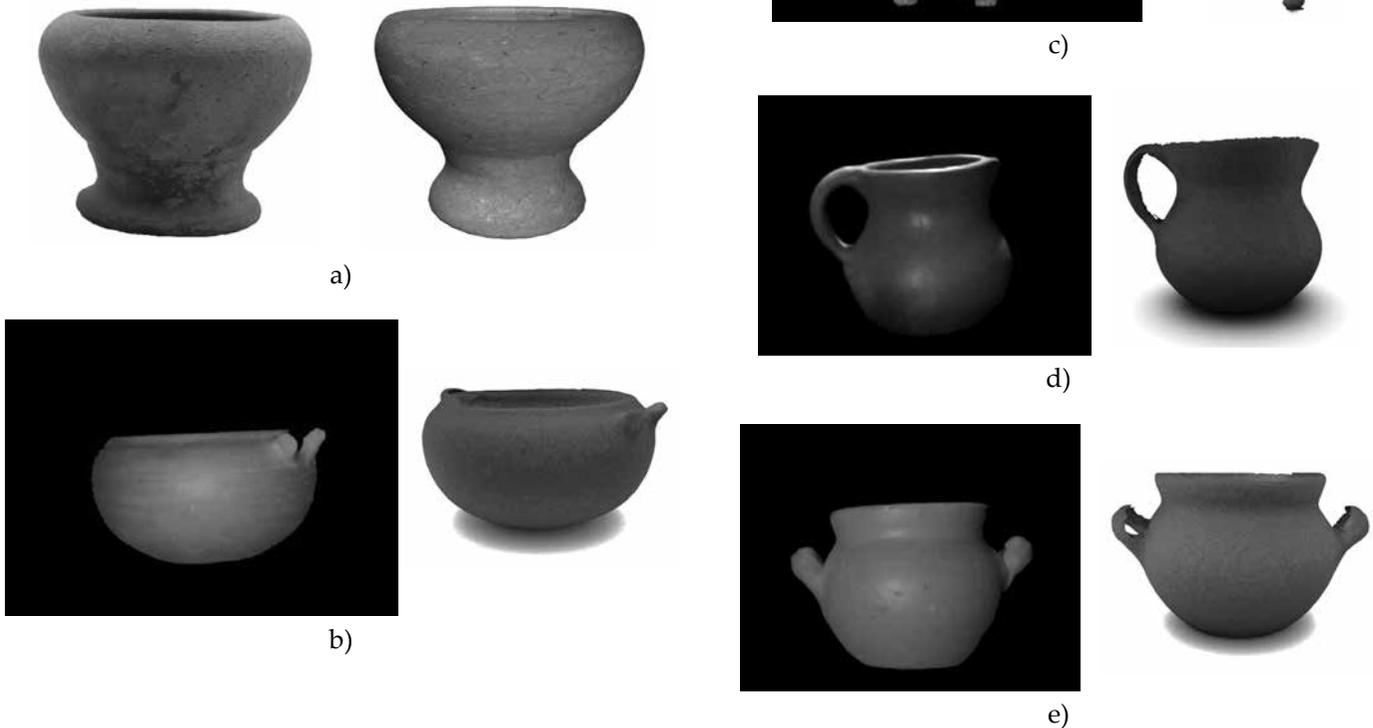
La Tabla 3, muestra la información relacionada con el conjunto de 5 objetos reconstruidos digitalmente y la Figura 10 muestra los modelos obtenidos.

Tabla 3. Descripción numérica y tiempo empleado para un conjunto de 5 objetos.
Table 3. Numerical description and time-consuming for a set of 5 objects.

	Objeto 1	Objeto 2	Objeto 3	Objeto 4	Objeto 5
Vértices	1223547	131109	96119	106276	174201
Triángulos	240356	260502	191960	211066	345205
Vistas	7	8	6	7	8
Imágenes de Textura	7	8	6	7	8
Tiempo filtrado de vistas (<i>outliers</i>) (seg)	3.32	3.23	2.12	3.19	4.02
Tiempo de fusión (seg)	142.3	132.2	102.3	129.4	150.8

Figura 9. Ejemplo de modelos reales y su reconstrucción tridimensional, izquierda imagen original, derecha modelo digital de los objetos a) Objeto 1, b) Objeto 2, c) Objeto 3, d) Objeto 4 y e) Objeto 5.

Figure 9. Samples of real model and its digital reconstruction, left original images, right digital model a) Object 1, b) Object 2, c) Object 3, d) Object 4 y e) Object 5.



Fuente: Elaboración propia.

5. CONCLUSIONES

- Mediante la aplicación de esta metodología es posible crear objetos con altos niveles de realismo en la reproducción de la textura y la forma con un montaje de adquisición rápida y simple.
- Se han descrito dos procedimientos orientados a la reparación de las anomalías más comunes que se presentan en la reconstrucción de este tipo de piezas; la eliminación de *outliers* o datos atípicos y la presencia de discontinuidades o huecos.
- Se describe un esquema de aplicación de texturas a objetos 3D que permite aumentar el nivel de realismo de las piezas digitales propiciando el uso de estas en escenarios de difusión cultural.
- Se presenta un caso de uso de una herramienta de uso libre como MeshLab como alternativa de apoyo tecnológico a proyectos basados en 3D.
- Se provee una guía para el desarrollo y tratamiento de objetos culturales cerámicos orientada a museos o entidades locales que deseen incorporar técnicas digitales para promover o estimular la difusión del patrimonio cultural.

REFERENCIAS

- [1] K. Sterflinger, "Fungi: Their role in deterioration of cultural heritage", *Fungal Biology Reviews*, 24 (2), 47-55, 2010.
- [2] G. Sanchez, J. Branch, "Revisión general de los modelos de reconstrucción tridimensional desde imágenes de rango", *Avances en sistemas e informática*, 5 (2), 23-31, 2008.
- [3] V. Domiter, B. Repnik, B. Zalik, A. Sadzak, S. Rizvic. (2009, Oct.). Surface reconstruction algorithms in cultural heritage digital representation. Information, Communication and Automation Technologies. 2009. Bosnia, (2009).
- [4] R. Scopigno, M. Callieri, P. Cignoni, M. Corsini, M. Dellepiane, F. Ponchio, and G. Ranzuglia, "3D Models for Cultural Heritage: Beyond Plain Visualization". *Computer*, 44 (7), 48-55, 2011.
- [5] Q. Yue. (2010, Oct.). Studies on Designs for Sustainable Development of Cultural Heritage Protection and Tourism from Perspectives of New Interactive and Real 3D Display Technology. Proceeding of the ISCID conference. 2010. China, (2010).
- [6] M. Doneus, G. Verhoeven, M. Fera, C. Briese, M. Kucera, W. Neubauer. "From deposit to point cloud - a study of low-cost computer vision approaches for the straightforward documentation of archaeological excavations". *Geoinformatics*, 6 (1), 81-88, 2011.
- [7] G. Verhoeven, D. Taelman, F. Vermeulen. "Computer vision-based orthophoto mapping of complex archaeological sites: the ancient quarry of pitaranha". *Archaeometry*, 54 (6), 1114-1129, 2012.
- [8] M. Rohith, G. Somanath, D. Norris, J. Gutierrez, and C. Kambhamettu. "A camera flash projector-based reconstruction system for digital preservation of artifacts". *J. Comput. Cult. Herit.*, 6 (1), 5-15, 2013.
- [9] I. Ihrke, K. Kutulakos, N. H. Lensch, M. Magnor, and W. Heidrich. State of the art in transparent and specular object reconstruction. Proceedings of the Eurographics conference. 2008. Crete, Greece, (2008).
- [10] J. Huang, C. Menq. "Combinatorial manifold mesh reconstruction and optimization from unorganized points with arbitrary topology", *Computer-Aided Design*, 34(2), 149 - 165, 2002.
- [11] D. Foster. "Color constancy", *Vision Research*, 51 (7), 674-700, 2011.
- [12] N. Kwok, H. Shi, Q. Ha, G. Fang, S. Chen, X. Jia. "Simultaneous image color correction and enhancement using particle swarm optimization", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26 (10), 2356-2371, 2013.
- [13] H. Kawamura, S. Yonemura, J. Ohya, A. Kojima. Gray-world-assumption-based illuminant color estimation using color gamuts with high and low chroma. Proceedings of the SPIE conference. 2013. California, EEUU, (2013).
- [14] Y. Furukawa, J. Ponce. "Accurate dense and robust multi-view stereopsis", *Computer Vision and Pattern Recognition*, 32 (8), 1362-1376, 2010.
- [15] C. Duan, C. Tu, X. Meng. Optimization of multi-view texture mapping for reconstructed 3D model. Proceedings of the Intelligent Control and Automation conference. 2010. China, (2010).