

COMPARACIÓN CUALITATIVA DE PROGRAMAS DE GENERACIÓN DE MODELOS  
3D PARA DOCUMENTAR Y DIGITALIZAR UN YACIMIENTO ARQUEOLÓGICO  
CON ARTE RUPESTRE.

Juan Carlos Valencia

Agosto 2017.

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL.

Facultad de Ciencia y Tecnología

Departamento de Tecnología

Electrónica

## **Agradecimientos**

A los dos grandes motores de mi vida, mi abuela María Eloísa y mi madre Blanca por su amor, su apoyo incondicional, por brindarme todos sus consejos, por ayudarme a ser una persona mejor cada día. A mis tíos Héctor y Fredy cuyos ejemplos orientaron gran parte de mi vida, a mi familia en general ya que a ellos les debo todo, mi formación, mis valores, mis fortalezas y todo lo bueno que ha pasado en mi vida.

Quiero agradecer a la Universidad por haberme permitido culminar mis estudios, por brindarme la oportunidad de afrontar los retos y dificultades que se presentaron a lo largo de este camino, por abrirme el camino correcto para llegar a donde estoy y finalmente por darme la oportunidad de conocer compañeros, amigos que me brindaron su ayuda, su conocimiento y experiencias vividas a lo largo de mis estudios.

Agradezco a mi director de Trabajo de Grado, el profesor Diego Rivera por haberme brindado su conocimiento, apoyo, tiempo y valiosos consejos para el desarrollo de mi labor siempre buscando la obtención de un trabajo de calidad, así como también al profesor Carlos Rodríguez cuyos consejos y apoyo hicieron posible este documento.

## Abstract

Los modelos en 3D son una herramienta desarrollada en los últimos años, la cual permite representar objetos reales en el mundo digital. La cantidad de programas que permiten generar modelos 3D se ha incrementado con el paso del tiempo y surge la necesidad de tener sistemas de comparación de la calidad de los mismos. Para llevar a cabo esta comparación se requiere determinar cuáles son los “*Criterios de Comparación*” relevantes, por medio de los cuales se podrá determinar cuál de todos los programas utilizados permitirán llevar a cabo una documentación completa y detallada de un yacimiento rocoso con arte rupestre ubicado en el municipio de Bojacá.

Asimismo se propone y se prueba una metodología que permita la comparación de las características más relevantes de los programas para generación de modelos 3D. La metodología está compuesta por la selección de los programas a utilizar y la selección de los “*Criterios de Comparación*”. Para hallar dichos criterios es necesario revisar la documentación existente y probar las herramientas, utilizarlas en diferentes medios, probar sus límites, sus cualidades, sus falencias y sus fortalezas. Toda esta información la podrá encontrar el desarrollo del documento, así como en una tabla final que resume y evalúa toda la información obtenida.

La falta de documentación adecuada de los programas es una de las dificultades que hicieron un poco más compleja la catalogación de los mismos, así como la falta de una metodología que permita la comparación cualitativa de los modelos 3D y que a su vez tenga esbozos de la metodología cuantitativa que posibilitará la graficación de los resultados para su mejor comprensión. Las técnicas de análisis que se encontraron exceden a los límites planteados en este trabajo, algunas de estas técnicas están consignadas en los anexos, puesto que no fueron utilizadas en el presente trabajo pero sí fueron consultadas.

En este trabajo se probó y se documentó la información de cada uno de los programas, desde su instalación, pasando por el primer uso, en el cual se generaron en primera instancia modelos 3D de objetos que se encuentran a la mano del usuario estándar, hasta las pruebas realizadas *in situ* por medio de las cuales se determinó la viabilidad del programa para documentar yacimientos con arte rupestre. Algunos programas generaron modelos 3D que mantenían la forma, el color y la textura del objeto original, infortunadamente algunos de estos programas no estaban en la posibilidad de ser usados en donde estaban los yacimientos arqueológicos y por ende no se llevaron a cabo las pruebas necesarias. De igual manera con toda esta información se pudo determinar las fortalezas y debilidades de cada programa, así como sus límites, sus alcances y el valor agregado que cada uno de éstos posee, así como comparar los resultados de la documentación anterior de la roca con la realizada por medio de este trabajo.

## Glosario

**Aplicación:** Es un programa informático, forma parte de lo que se denomina como software. Las aplicaciones, son programas concebidos con la finalidad de ayudar al usuario de la computadora a realizar una tarea específica, como reproducir música, videos, crear video juegos y en este caso particular generar modelos 3D.

**Cloud Compare:** Software de procesamiento de nubes en puntos 3D. CloudCompare proporciona un conjunto de herramientas básicas para editar y renderizar manualmente nubes de puntos 3D y mallas triangulares. También ofrece varios algoritmos avanzados de procesamiento, entre los cuales los métodos para realizar Proyecciones, Registro, Cálculo de distancia, Cálculo estadístico y Estimación de las características geométricas (densidad, curvatura, rugosidad, orientación del plano geológico)

**Comparación:** Análisis de entidades para establecer sus semejanzas y/o diferencias. En ciencias implica el cálculo de algún indicador numérico o métrica (método cuantitativo) o equipara ciertas características internas del funcionamiento del programa y su comportamiento respecto al problema propuesto.

**Malla poligonal** (*Polygonal mesh*): Una malla es un conjunto de polígonos y vértices que definen la forma de un objeto, el cual tiene datos de las coordenadas propias del objeto.

**Matriz:** Arreglo rectangular de datos numéricos, los cuales se pueden sumar y multiplicar. Se emplea ampliamente para la representación de diversos conceptos en todas las ciencias.

**MPEG-4:** Lenguaje de modelado de realidad virtual el cual especifica la extensión del Framework de animación (AFX) de MPEG-4, este es un modelo para representar el contenido de gráficos 3D. MPEG-4 se aplica a objetos sintéticos de nivel superior para especificar la geometría, la textura, la animación y algoritmos de compresión dedicados. La

mayoría de las características que conforman el estándar MPEG-4 no están disponibles en todas las implementaciones. Para manejar esta variedad, el formato estándar incluye el concepto de perfil y nivel, lo cual permite definir conjuntos específicos de capacidades que pueden ser implementados para cumplir con objetivos particulares.

**Nube de Puntos:** Son aquellos datos válidos para poder definir adecuadamente los objetos tridimensionales, por lo general son un conjunto de vértices (coordenadas X, Y y Z) los cuales representan la capa exterior de un objeto.

**Recuperación de Información:** Se refiere a la capacidad de un sistema de aproximar respuestas a una solicitud en particular. En general se denomina así al proceso realizado para responder consultas en aplicaciones tales como las bases de datos y los motores de búsqueda.

**Similitud:** También conocida como semejanza. Se puede definir como la intensidad de la relación entre dos entidades cuya medida se basa en las características que comparten y en las que difieren.

**SNHC:** Hace parte del esfuerzo de estandarización de MPEG-4 en representación multimedia, codificación y las comunicaciones. SNHC significa Codificación sintético / natural híbrido y se ocupa de la representación y la codificación de la información audiovisual generada sintéticamente y naturalmente. Esto representa un aspecto de MPEG-4 para combinar diferentes tipos de medios incluyendo tanto naturales como sintéticos, *streaming* y descargado objetos A / V en formas útiles. Esto permitirá la interoperabilidad de los flujos de medios y las descargas de los decodificadores basadas en hardware y software, y fomentará el intercambio y la amplia utilización de una variedad de tipos de medios y de su composición en experiencias atractivas.

**Software:** Es una palabra de origen inglés que no tiene traducción directa al español, razón por la cual ha sido asimilada por literalmente. Su significado más genérico se refiere al

soporte lógico de una computadora, es decir, es la interfaz que permite que el usuario interactúe con la parte física de la computadora (Hardware).

**Sopa de polígono** (*Polygon Soup*): Es otro tipo de representación de modelos 3D, La cual algunas veces se considera como "mal definida" debido a que realmente no define un objeto 3D o superficie de colector, realmente es una colección de puntos, líneas, polígonos independientes y mallas que crean una ilusión de forma 3D. A pesar de su naturaleza "mal definida", la mayoría de los modelos disponibles en la red (por ejemplo, modelos VRML), o los modelos utilizados en la industria de entretenimiento son modelos de sopa de polígono.

**Teselación:** Forma por medio de la cual se divide la superficie de un objeto, generalmente se utilizan triángulos teselados unos con otros para representar la forma de los objetos escaneados.

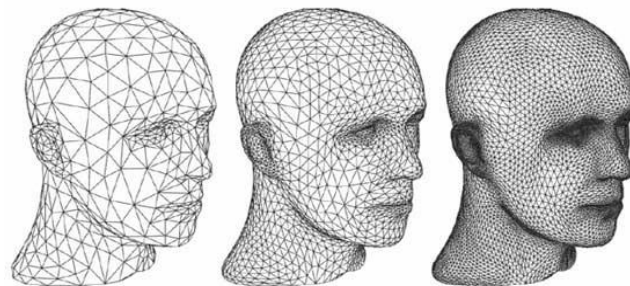



Figura 1. Teselación de un rostro humano. Tomado de <https://josepjroca.wordpress.com/2013/05/17/gran-turismo-6-la-competencia-es-buena-y-en-polyphony-son-unos-genios/>

**VRML** (*Virtual Reality Modeling Language*): El lenguaje de modelado de realidad virtual es un formato de archivo normalizado que tiene como objetivo la representación de escenas u objetos interactivos tridimensionales diseñado particularmente para web.

 UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL <small>SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN</small>	<b>FORMATO</b>  <b>RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE</b>	
Código: FOR020GIB	Versión: 01	
Fecha de Aprobación: 10-10-2012	Página 8 de 140	

1. Información General	
Tipo de documento	Trabajo de grado
Acceso al documento	Universidad Pedagógica Nacional. Biblioteca Central
Título del documento	Comparación cualitativa de programas de generación de modelos 3D para documentar y digitalizar un yacimiento arqueológico con arte rupestre.
Autor(es)	Valencia, Juan Carlos
Director	Rivera Pinzón, Diego
Publicación	Bogotá. Universidad Pedagógica Nacional, 2017 140 p.
Unidad Patrocinante	Universidad Pedagógica Nacional
Palabras Claves	YACIMIENTO ROCOSO, MODELOS 3D, ARTE RUPESTRE, SENSOR, FOTOGRAMETRÍA, COMPARACIÓN CUALITATIVA

2. Descripción
Trabajo de grado, que propone generar modelos 3D de yacimientos rupestres para lograr una mejor documentación de las rocas y de los pictogramas consignados en ellas. Para ello se probarán diferentes programas de modelado 3D para identificar por medio de una comparación cualitativa de su rendimiento cuales generan los mejores resultados.

3. Fuentes
<p>Agisoft, L. L. C. (2014). Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition.</p> <p>Arias-Cabarcos, P., Marín, A., Palacios, D., Almenárez, F., &amp; Díaz-Sánchez, D. (2016). Comparing Password Management Software: Toward Usable and Secure Enterprise Authentication. IT Professional, 18(5), 34-40.</p> <p>Bednarik, Robert. A taphonomy of paleoart. Antiquity. 68: 68-74.  <a href="http://cogweb.ucla.edu/ep/Art/Bednarik_94.html">http://cogweb.ucla.edu/ep/Art/Bednarik_94.html</a> 1994.</p>



- Brutto, M. L., & Meli, P. (2012). Computer vision tools for 3D modelling in archaeology. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 1(1\_suppl), 1-6.
- Bures, M., & Polcar, J. (2016, December). Comparison of 3D scanning and 3D modelling of a workplace from various aspects. In *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 2016 IEEE International Conference on (pp. 306-310). IEEE.
- Caro, J. L. (2012). Fotogrametría y modelado 3D: un caso práctico para la difusión del patrimonio y su promoción turística.
- Di Ruscio, D., Kolovos, D. S., Korkontzelos, Y., Matragkas, N., & Vinju, J. (2016, September). Supporting Custom Quality Models to Analyse and Compare Open-Source Software. In *Quality of Information and Communications Technology (QUATIC)*, 2016 10th International Conference on the (pp. 94-99). IEEE.
- E. Paquet and M. Rioux, Nefertiti: a Query by Content Software for Three-Dimensional Databases Management, *Proc. Int'l Conf. on Recent Advances in 3-D Digital Imaging*
- GIPRI, G. C., Guillermo MUÑOZ, G. M. C., & Carlos Rodríguez, C. R. M. (2015). Catalogación, Documentación, Primeros-Diagnósticos y Valoración del Arte Rupestre del Municipio de Pandi, Cundinamarca Convenio No. 220 de 2015 Gobernación de Cundinamarca, Idecut-Municipio de Pandi Convenio No. 106 de 2015 Municipio de Pandi-Corporación Gipri Colombia.
- Granero, L., Díaz, F., Millet, F., Domínguez, R., & Sanjuán, Y. (2011). Tecnologías ópticas aplicadas a la visualización y presentación 3D de patrimonio. Caso práctico de la Virgen del Rebollet de Oliva. *Virtual Archaeology Review*, 2(3), 43-47.
- Habib, A. F., Ghanma, M., Al-Ruzouq, R., & Kim, E. (2004). 3d modelling of historical sites using lowcost digital cameras. En *Xxxvth congress of isprs. ISPRS*.
- Herbert Edelsbrunner, Ernst P. Mücke, Three-dimensional Alpha Shapes, *ACM TOG*, 13(1), pp. 43-72, (1994)
- Hernández, J., & Prieto, F. (2007). Metodología de evaluación cuantitativa de modelos texturados. *Dyna*, (151), 115-124.
- Jiménez, J. G., García, M., Revelles, J., & Melero, F. J. (2012). Digitalización 3D y difusión en web del patrimonio de las universidades andaluzas mediante X3D y WebGL. *Virtual Archaeology Review*, 3(7), 55-59.
- Laksono, D. (2016, August). Open source stack for Structure from Motion 3D reconstruction: A geometric overview. In *Engineering Seminar (InAES)*, International Annual (pp. 196-201). IEEE.
- Longuet-Higgins, H. C. (1981). A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections. *Nature*, 293, 133{135.
- LÓPEZ MONTALVO, E. (2010). Imágenes en la roca: del calco directo a la era digital en el registro gráfico del arte rupestre levantino. *CLIO–Série Arqueológica*, Recife, 25(1), 153-190.

- López-Menchero Bendicho, V. M., & Serio Tejero, I. (2011). La puesta en valor del arte rupestre: nuevas técnicas de presentación de un patrimonio singular. *Estrat crític*, 5(1), 0022-031.
- López-Menchero Bendicho, V. M., & Serio Tejero, I. (2011). La puesta en valor del arte rupestre: nuevas técnicas de presentación de un patrimonio singular. *Estrat crític*, 5(1), 0022-031.
- Manferdini, A. M., & Galassi, M. (2013). Assessments for 3d reconstructions of cultural heritage using digital technologies. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5 W, 1, 167-174.
- Martinez Celis, D., Fique, S., Rodriguez Larrota, M., & Mendoza Lafaurie, S. (2015). Inventario de sitios con arte rupestre del Municipio de Bojacá, Cundinamarca (Colombia).
- Martínez Celis, Diego y Botiva Contreras. Alvaro. Manual de arte rupestre en Cundinamarca. ICANH – Gobernacion de Cundinamarca. Primera edicion, Bogota, 2002. (Segunda edicion, 2004).
- Moure Romanillo, a. (1982): "La conservación del arte rupestre español" en *Revista de Arqueología*, nº 22, pp. 54-55.
- Moure Romanillo, a. (1999): "Arte rupestre y sociedad. Conservación y divulgación", en A Moure Romanillo, *Arqueología del arte rupestre en la Península Ibérica*, Madrid, Síntesis, pp. 177-198.
- Muñoz, G. (1999). Arte rupestre en Colombia: Un modelo educativo de recuperación y estudio del patrimonio rupestre. *FOLIOS*, 11, 1-9.
- Muñoz, G., Trujillo, J., Rodriguez Martinez, C. A., & Riveros, N. (2014). Arte rupestre en Choachí. Informe final Agosto 2014.
- Naranjo Sánchez, B. A. (2015). Calidad del software educativo: Metodología de Evaluación de software educativo para determinar el que cumple con las especificaciones basadas en estándares internacionales.
- Ohbuchi, R., & Takei, T. (2003, October). Shape similarity comparison of 3D models using alpha shapes. In *Computer Graphics and Applications*, 2003. Proceedings. 11th Pacific Conference on (pp. 293-302). IEEE.
- ORTEGA GONZALEZ, E. V. (2008). Una técnica para el análisis de similitud entre imágenes (Doctoral dissertation).
- Política para promover la apropiación social del patrimonio a través de la participación comunitaria. En <http://www.mincultura.gov.co/?idcategoria=23394>. 2010
- Sakaguchi, Y., Ishio, T., Kanda, T., & Inoue, K. (2015, September). Extracting a unified directory tree to compare similar software products. In *Software Visualization (VISSOFT)*, 2015 IEEE 3rd Working Conference on (pp. 165-169). IEEE.
- Sanz, I. D., Bonilla, V. V., Montalvo, E. L., García, J. L. L., & López, M. C. (2013). Reflexiones sobre las técnicas de documentación digital del arte rupestre: la restitución bidimensional (2D) versus la tridimensional (3D). In *Cuadernos de arte rupestre* (Vol. 6, pp. 21-32). Dirección General de Bienes Culturales de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.

Sipiran Mendoza, I. A. (2014). Local features for shape matching and retrieval.

Snavely, N., Seitz, S. M., & Szeliski, R. (2006, July). Photo tourism: exploring photo collections in 3D. In ACM transactions on graphics (TOG) (Vol. 25, No. 3, pp. 835-846). ACM.

Sona, G., Pinto, L., Pagliari, D., Passoni, D., & Gini, R. (2014). Experimental analysis of different software packages for orientation and digital surface modelling from UAV images. *Earth Science Informatics*, 7(2), 97-107.

Valle Chávez, A. (2016). Recuperación y comparación de figuras en 3D.

Wamg, & Ahmad, A. (2002). Digital architectural photogrammetric recording of historical building and monuments. *New Zeland Surveyor*(293), 25{30.

Wessex Archaeology. (2007). A virtual stonehenge landscape. <https://vimeo.com/387367> acc.sept. 2012.

Wu, K. (1996). Computing parametric geon descriptions of 3d multi-part objects (Doctoral dissertation, McGill University).

#### 4. Contenidos

##### Introducción:

En el cual se hace la Justificación del problema, y se establecen los antecedentes del documento los cuales servirán de guía en el resto del documento. Así mismo se establecen las delimitaciones y los aportes del trabajo.

##### Marco Conceptual

Se realiza la caracterización del contexto geográfico enfocándose Región Andina en específico en el municipio de Bojacà. Además, se hace una caracterización de las zonas agroecológicas. También, se encuentra el contexto histórico de la documentación de los yacimientos rocosos con arte rupestre. De igual manera se establece la metodología de trabajo.

##### Desarrollo

En este capítulo se realiza la comparación cualitativa de cada uno de los programas que fueron utilizados para generar los modelos 3D del yacimiento rupestre, en él se establecen las fortalezas y debilidades de cada uno de los programas.

##### Resultados Experimentales

En este apartado se exhiben los resultados obtenidos por medio de la comparación de los programas, en él se encuentran las tablas comparativas así como una tabla comparativa final en la cuál está consignada toda la información correspondiente a cada programa. Las conclusiones también las encontrará en este capítulo.

#### 5. Metodología

- Mixta, es una metodología que incluye componentes de la metodología Cualitativa y Cuantitativa.

--

## 6. Conclusiones

- La documentación de los yacimientos arqueológicos demanda herramientas autónomas que no requieran medios externos para poder ser utilizadas, en el desarrollo de este documento se pudo evidenciar como algunos programas que se perfilaban como candidatos idóneos para realizar la documentación de un yacimiento rupestre, se convirtieron en opciones no viables con el pasar de las prueba, debido a las limitantes propias del terreno y del objeto a escanear. Al ser el primer trabajo de este tipo que se desarrollaba en el municipio de Bojacá no se encontró mucha documentación sobre la metodología adecuada para comparar los programas, ni los modelos generados.

Skanect fue uno de los programas cuyos modelos 3D destacan por su gran exactitud y similitud con el objeto original, este se convertiría en una opción inviable para llevar a cabo la documentación de los yacimientos rocosos, debido a la necesidad del sensor Kinect de una conexión con la corriente eléctrica, de igual manera el escaneo de una roca de las dimensiones de yacimiento del municipio de Bojacá haría necesario la implementación de un nuevo artefacto que facilitara el movimiento del sensor alrededor de una roca de grandes dimensiones, de igual manera sucedió con los programas de modelado 3D proporcionados por AutoDesk (Remake y 360 Recap) cuyos modelos 3D en cuanto a la forma, color, textura y dimensiones eran idénticos al real y cuyos resultados los perfilaban como candidatos seguros a realizar una documentación del arte rupestre satisfactoria, se vieron opacados debido a que la cantidad de fotografías que podrían procesar era limitada (50 fotografías) esto limitaba enormemente el tamaño del modelo a crear y por lo tanto influía enormemente en su valoración final, Photo Scan de Agisoft, no fue coincidencia, su elección como el programa con el mejor rendimiento, debido a que PhotoScan posee una de las características decisivas en la documentación de yacimientos rupestres como la portabilidad, es decir la capacidad de llevar las aplicaciones a cualquier lugar, ya que por regla general los yacimientos arqueológicos quedan en zonas muy apartadas, otra característica muy importante es la maniobrabilidad debido a que esta permite realizar la documentación del yacimiento rocoso sin tener que acudir a técnicas y a otros accesorios para hacer llegar el sensor a las zonas más alejadas de la roca. Agisoft PhotoScan reúne todas estas características, su fácil manejo, su maniobrabilidad, su independencia y la calidad de los modelos generados hacen de este programa el más adecuado para generar modelos 3D de yacimientos rocosos.

<b>Elaborado por:</b>	Juan Carlos Valencia
<b>Revisado por:</b>	Diego Rivera Pinzón

<b>Fecha de elaboración del Resumen:</b>	24	08	2017
--	----	----	------

## ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos.....	2
Abstract.....	3
Glosario.....	5
Tabla de Figuras. ....	15
Tablas.....	18
1. Introducción .....	19
1.1 Planteamiento del problema .....	21
1.2 Justificación .....	22
1.3 Antecedentes .....	25
Arte Rupestre. ....	25
Especificaciones del sitio.....	28
Características típicas del Arte Rupestre en Bojacá.....	32
Modelado 3D Y Fotogrametría.....	32
1.4 Objetivos .....	36
Objetivo general.....	36
Objetivos específicos.....	36
1.5 Delimitaciones .....	36
1.6 Aportes .....	37
2. Marco conceptual.....	38
2.1 Conceptos generales.....	38
Tipos de soporte rocoso. ....	38
Modalidad, pigmentos y técnica de aplicación. ....	38
Sales y mineralización de la superficie.....	39
Iconografía.....	39
Modelado 3D.....	40
Problemas con la comparación de Objetos 3D.....	41
Técnicas de comparación.....	43
Causas de degradación de los yacimientos.....	43
2.2 Metodología .....	44
3 Desarrollo.....	52
3.1 Android .....	52
123d Catch® .....	52
Scann3d® .....	58
3.2 Windows.....	63

<b>Photoscan Agisoft®</b> .....	63
<b>Autodesk Remake®</b> .....	72
<b>3d Som.</b> .....	77
<b>Autodesk 360 Recap®</b> .....	82
<b>3.3 Kinect</b> .....	86
<b>Skaneet.</b> .....	89
<b>ReconstructMe.</b> .....	96
<b>Kscan3d.</b> .....	100
<b>4. Resultados experimentales</b> .....	106
<b>Tablas</b> .....	106
<b>Características Básicas</b> .....	109
<b>Características Propias del Modelado.</b> .....	113
Características propias del modelado de arte rupestre .....	117
<b>Conclusiones</b> .....	119
<b>5. Bibliografía</b> .....	122
<b>6. Anexos</b> .....	127
<b>Cartilla explicativa del uso de la herramienta Agisoft PhotoScan</b> .....	127
<b>Técnicas de comparación de modelos 3D cualitativas.</b> .....	127
<b>Hardware recomendado para el funcionamiento adecuado de PhotoScan,</b> .....	139

## Tabla de Figuras.

Figura 1. Teselación de un rostro humano. Tomado de <a href="https://josepbroca.wordpress.com/2013/05/17/gran-turismo-6-la-competencia-es-buena-y-en-polyphony-son-unos-genios/">https://josepbroca.wordpress.com/2013/05/17/gran-turismo-6-la-competencia-es-buena-y-en-polyphony-son-unos-genios/</a> .....	7
Figura 2. Aspecto de una superficie rocosa con manifestaciones pictográficas, empleada como mural para un grafiti. Foto: Mario Rodríguez, 2015 .....	23
Figura 3. Alto de la Cruz, Bojacá. Tomado de (Martínez Celis, 2015).....	31
Figura 4. Grupo de pinturas rupestres, Alto de la Cruz, Bojacá. Foto: Diego Martínez Celis, 2015.....	32
Figura 5. Panorámica del objeto de estudio. Alto de la Cruz, Bojacá. Foto: Diego Martínez Celis, 2015. ....	33
Figura 6. Ejemplo de grafiti sobre yacimiento rocoso. Foto: Mario Rodríguez L, 2015 .....	44
Figura 7. Evaluación de Rendimiento de las aplicaciones utilizando el Criterio de las 5 E. Tomado de: Arias-Cabarcos (2016).....	50
Figura 8. Gráfica comparativa Evaluación de Rendimiento de las aplicaciones utilizando el Criterio de las 5 E. Tomado de: Arias-Cabarcos (2016).....	50
Figura 9. Entorno de la aplicación 123D Catch. Retomado de 123D Catch. ....	53
Figura 10. Interfaz gráfica de 123D Catch para iniciar una nueva captura. Retomado de 123D Catch .....	54
Figura 11. Interfaz gráfica del programa usada para tomar fotografías. Retomado de 123D Catch .....	55
Figura 12. .Interfaz gráfica de Autodesk 123D Catch® para editar la malla. (Modelo sin editar). Recuperado Autodesk 123D Catch.....	56
Figura 13. Interfaz gráfica de Autodesk 123D Catch para editar la malla generada. Recuperado Autodesk 123D Catch.....	57
Figura 14. Interfaz Inicial del programa. Retomado de SCANN3D.....	59
Figura 15. Forma como deben tomarse la foto para garantizar mejores resultados. Retomado SCANN3D .....	59
Figura 16. Uno de los primeros objetos escaneados con la aplicación. Retomado SCANN3D.....	60
Figura 17. Busto de Camilo Torres. ....	61
Figura 18. Modelo 3D generado del busto de Camilo Torres. Retomado de SCANN3D.....	61
Figura 19. Interfaz de exportación de los modelos 3D generados. Retomado SCANN3D.....	62
Figura 20. Imágenes recuperadas de <a href="http://www.agisoft.com/pdf/tips_and_tricks/Image%20Capture%20Tips%20-%20Equipment%20and%20Shooting%20Scenarios.pdf">http://www.agisoft.com/pdf/tips_and_tricks/Image%20Capture%20Tips%20-%20Equipment%20and%20Shooting%20Scenarios.pdf</a> .....	66
Figura 21. Barra de Herramientas del programa. Retomado de PhotoScan .....	67
Figura 22. Carga de fotos en el programa. Retomado PhotoScan.....	67
Figura 23. Resultado del proceso de Orientar Fotos, los rectángulos azules representan la posición de la cámara en cada una de las fotos que se tomaron. Retomado PhotoScan.....	68
Figura 24. Nube de puntos densa del yacimiento rocoso. Retomado PhotoScan. ....	69
Figura 25. Modelo 3D del yacimiento rocoso. Retomado Agisoft PhotoScan. ....	71
Figura 26. Modelo 3D de la rana ubicada en las instalaciones de la Universidad Pedagógica Nacional. Retomado de PhotoScan.....	72

<i>Figura 27. Carga de fotos en el programa y su límite. Retomado de AutoDesk Remake</i> .....	74
<i>Figura 28. Modelo 3D del yacimiento rocoso. Retomado de AutoDesk Remake</i> .....	75
<i>Figura 29. Modelo 3D de la rana. Retomado de AutoDesk Remake</i> .....	75
<i>Figura 30. Herramienta de Rayos X. Retomado de AutoDesk Remake</i> .....	76
<i>Figura 31. Interfaz de inicio 3DSOM PRO. Retomado 3DSOM</i> .....	78
<i>Figura 32. Imágenes eliminadas automáticamente. Retomado de 3D SOM</i> .....	79
<i>Figura 33. Nube de puntos densa y posición de la cámara. Retomado 3D SOM</i> .....	80
<i>Figura 34. Resultado final de la construcción del modelo 3D. Retomado 3D SOM</i> .....	81
<i>Figura 35 Pantalla de inicio, se pueden ver los diferentes modelos 3D generados por la aplicación.</i> <i>Retomado AutoDesk 360 Recap</i> .....	83
<i>Figura 36. Configuraciones iniciales del modelo a crear. Retomado AutoDesk 360 Recap</i> .....	84
<i>Figura 37. Modelo 3D del yacimiento arqueológico. Retomado AutoDesk 360 Recap</i> .....	85
<i>Figura 38 Modelo 3D de la Rana ubicada en la Universidad Pedagógica Nacional.</i> <i>Retomado AutoDesk 360 Recap</i> .....	85
<i>Figura 39. Diferentes herramientas que ofrece AutoDesk 360 Recap para editar o descargar los modelos.</i> <i>Retomado AutoDesk 360 Recap</i> .....	86
<i>Figura 40. Sensor utilizado para realizar la construcción de los Modelos 3D. Imagen retomada de</i> <i><a href="http://www.arkadian.vg/uso-de-kinect-para-manipular-tu-pc-con-gestos/">http://www.arkadian.vg/uso-de-kinect-para-manipular-tu-pc-con-gestos/</a></i> .....	88
<i>Figura 41 Pantalla de inicio Skanect. Retomado de Skanect</i> .....	90
<i>Figura 42. Detalle de la viñeta de verificación de los requisitos mínimos para iniciar el escaneo. Retomado</i> <i>Skanect</i> .....	91
<i>Figura 43 Configuraciones adicionales del programa. Retomado Skanect</i> .....	91
<i>Figura 44 Configuración inicial para un nuevo modelo. Retomado de Skanect</i> .....	92
<i>Figura 45. Proceso de escaneo de la Rana de la Universidad. Retomado de Skanect</i> .....	93
<i>Figura 46 Modelo 3D generado sin colores e identificación del movimiento del sensor alrededor del mismo.</i> <i>Proceso de escaneo de la Rana de la Universidad. Retomado de Skanect</i> .....	93
<i>Figura 47 Procesado del modelo y sus diferentes herramientas. Proceso de escaneo de la Rana de la</i> <i>Universidad. Retomado de Skanect</i> .....	94
<i>Figura 48. Modelo Final. Proceso de escaneo de la Rana de la Universidad. Retomado de Skanect</i> .....	95
<i>Figura 49 Opciones de importación del modelo 3D. Retomado de Skanect</i> .....	95
<i>Figura 50 Pantalla de inicio ReconstructMe. Retomado de ReconstructMe</i> .....	97
<i>Figura 51. Modelo 3D de la rana generado por medio de ReconstructMe.</i> <i>Retomado de ReconstructMe</i> .....	98
<i>Figura 52. Bordes sin delimitar en la reconstrucción del modelo 3D. Retomado de ReconstructMe</i> .....	98
<i>Figura 53. Herramientas iniciales de KScan3D. Retomado de KScan3D</i> .....	102
<i>Figura 54. Herramientas para la generación de las mallas. Retomado de KScan3D</i> .....	102
<i>Figura 55. Pantalla de escaneo. Retomado de KScan3D</i> .....	103
<i>Figura 56 Instantáneas tomadas del objeto a escanear. Retomado de KScan3D</i> .....	104



<i>Figura 57 Modelo 3D generado a partir de las capturas. Retomado de KScan3D.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 58. Reconstrucción de la rana por medio del programa KScan3D. Retomado de KScan3D.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 59. Convenciones utilizadas en las tablas para determinar la viabilidad de cada uno de los programas. .....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 60. Grafica comparativa entre los mejores programas utilizados .....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 61. Diagrama genérico para la búsqueda de similitud de formas de los modelos 3D geométricos. Tomado de: Herbert Edelsbrunner, Ernst P. Mücke, Three-dimensional Alpha Shapes, ACM TOG, 13(1), pp. 43-72, (1994) .....</i>	<i>130</i>
<i>Figura 62. Ejemplo de figura con dificultades para una recuperación. Tomado de: “Sipiran Mendoza, I. A. (2014). Local features for shape matching and retrieval. Valle Chávez, A. (2016). Recuperación y comparación de figuras en 3D” .....</i>	<i>135</i>
<i>Figura 63. Una figura en 3D de un cerebro, representada mediante malla de polígonos triangulares. Tomado de: Sipiran Mendoza, I. A. (2014). Local features for shape matching and retrieval. Valle Chávez, A. (2016). Recuperación y comparación de figuras en 3D.....</i>	<i>136</i>
<i>Figura 64. Nube de puntos escaneada de un área de trabajo y su respectiva representación en 3D. Tomado de: “Comparison of 3D scanning and 3D modelling of a workplace from various aspects. In Industrial Engineering and Engineering Management” .....</i>	<i>137</i>
<i>Figura 65. Nube de puntos a malla, la distancia es medida en metros y comparada con el original. Tomada de: “Comparison of 3D scanning and 3D modelling of a workplace from various aspects. In Industrial Engineering and Engineering Management” .....</i>	<i>139</i>

## Tablas

<i>Tabla 1. Demanda de tiempo de la evaluación ergonómica. Tomado y traducido de: “Comparison of 3D scanning and 3D modelling of a workplace from various aspects. In Industrial Engineering and Engineering Management”,.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 2. Primer uso de los programas para generación de modelos 3D.....</i>	<i>108</i>
<i>Tabla 3. Ergonomía de los programas seleccionados, describe la facilidad de uso del programa.....</i>	<i>109</i>
<i>Tabla 4. Automatización de los programas utilizados, describe la cantidad de pasos que se debe realizar antes de generar un modelo.....</i>	<i>110</i>
<i>Tabla 5. Aprendizaje de los programas, describe que tan fácil es de aprender y si el programa cuenta o no con un tutorial. ....</i>	<i>111</i>
<i>Tabla 6. Tolerancia a los errores, describe que tan proclive es el programa a generar errores y como se recupera de estos.....</i>	<i>112</i>
<i>Tabla 7. Tiempo empleado. Describe el tiempo que utiliza el programa en generar un modelo 3D.....</i>	<i>113</i>
<i>Tabla 8. Calidad de los modelos, describe las similitudes entre el objeto real y el modelo 3D generado. ....</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 9. Inter operatividad, describe la capacidad del programa de exportar los modelos a otros tipos de formato. ....</i>	<i>115</i>
<i>Tabla 10. Valor agregado de las aplicaciones, describe aquellas características relevantes del programa.....</i>	<i>116</i>
<i>Tabla 11. Portabilidad, describe la facilidad de uso de la herramienta y su autonomía para generar los modelos 3D.....</i>	<i>117</i>
<i>Tabla 12. Resultados numéricos de la comparación de los programas.....</i>	<i>118</i>
<i>Tabla 13. Tabla comparativa final, describe todos los resultados obtenidos en las diferentes pruebas.....</i>	<i>119</i>

## 1. Introducción

En términos generales se conoce como *arte rupestre*, a los grabados (petroglifos) y las pinturas (pictografías) realizados por grupos humanos del pasado sobre superficies rocosas en emplazamientos naturales. En cuevas, rocas, muros y abrigos rocosos, la humanidad ha consignado de una manera gráfica y sintética innumerables representaciones de animales, plantas u objetos, escenas de la vida cotidiana, signos y figuras geométricas, etc. Aunque estas evidencias se pueden encontrar también en otros soportes pétreos de carácter mueble como cantos rodados, fragmentos líticos y tallas o haciendo parte de lajas, estelas, esculturas, muros o edificaciones en piedra, la denominación *arte rupestre* hace especial referencia a aquellos motivos, trazos o marcas que han sido plasmados sobre superficies pétreas naturales, las cuales se han mantenido *in situ* (Martínez, 2015).

Las áreas de conservación, protección y preservación son definidas cuando son constituidas dentro del patrimonio arqueológico y como tal han sido declarados bienes de interés cultural de la nación. Del mismo modo se establece en la Ley general de Cultura que el patrimonio cultural de la Nación está constituido por todos los bienes materiales, las manifestaciones inmateriales, los productos y las representaciones de la cultura que son expresión de la nacionalidad colombiana, tales como la lengua castellana, las lenguas y dialectos de las comunidades indígenas, negras y creoles, la tradición, el conocimiento ancestral, el paisaje cultural, las costumbres y los hábitos, así como los bienes materiales de naturaleza mueble e inmueble a los que se les atribuye, entre otros, especial interés histórico, artístico, científico, estético o simbólico en ámbitos como el plástico, arquitectónico, urbano, arqueológico, lingüístico, sonoro, musical, audiovisual, fílmico, testimonial, documental, literario, bibliográfico, museológico o antropológico. (Ministerio de Cultura, 2008)

En la actualidad el arte rupestre se halla sujeto a grandes problemas de conservación, debido a que los yacimientos arqueológicos están expuestos a diferentes factores de

intervención antrópicas. En consecuencia, la implementación de nuevas técnicas de documentación, como la creación de modelos 3D, cobra cada vez una mayor relevancia en el campo de la conservación y documentación de yacimientos rocosos con arte rupestre. En las últimas décadas las técnicas digitales han proliferado como el método más habitualmente usado en la documentación de Patrimonio Histórico y Cultural, por ello, se ha convertido en un referente no solamente en la difusión de obras de arte, sino también en diferentes disciplinas como la industria, la arqueología, la conservación de monumentos históricos hasta la conservación de yacimientos arqueológicos. Paralelamente, los modelos tridimensionales resultan muy útiles para representar objetos concretos en el mundo digital. Su uso se encuentra difundido a través de muchas profesiones tales como medicina, ingeniería, seguridad y otros, con la introducción de dispositivos de captura variados (como celulares o tabletas) se ha incrementado el interés por este tipo de información, generando una gran cantidad de aplicaciones disponibles en diferentes ubicaciones.

Dentro de estas aplicaciones se encuentran distribuciones disponibles en los principales Sistemas Operativos, como Android, iOS y Windows. Las aplicaciones encontradas fueron evaluadas por medio de una metodología determinada y de ellas se escogió la que mejores resultados proporcionó. Y es aquí en donde se evidencia la importancia de la evaluación de similitud de modelos 3D, ya que puede ser útil para procesos de alto nivel tales como recuperación por contenido y reconocimiento. Estos procesos requieren atención ya que el software de creación de modelos 3D está en constante desarrollo.

La finalidad de este trabajo es determinar cual de todas las aplicaciones disponibles en el mercado genera los mejores resultados en la documentación del arte rupestre del municipio de Bojacá. El primer problema que se abordó es determinar cual de todas las opciones que hay en el mercado resultan viables, debido a que al buscar en el navegador “Modelos 3D” las

opciones que aparecen son de lo más variadas, algunas como **SentiSculpt SDK**<sup>1</sup> la cual es una herramienta para crear modelos 3D a través de fotografías, así como también se encontraron aplicaciones para Android como **SCANN3D**<sup>2</sup> el cual permite generar modelos 3D a partir del teléfono celular y se encontraron diversas aplicaciones para utilizar el Kinect de Windows como escáner de objetos.

Así mismo, se propone y se prueba una metodología la cual permite la comparación de modelos 3D. La metodología se compone de la selección de las cualidades predominantes tanto en la parte integral del programa (es decir su funcionalidad interna) así como la calidad de los modelos generados y la velocidad con la que la aplicación genera los modelos respectivos. De todas estas cualidades se creó una tabla en la cual se comparan todos los programas encontrados, permitiendo así un balance de todos ellos, de esta manera es posible escoger el que mejores prestaciones tenga frente a la documentación y digitalización de un yacimiento rupestre.

### **1.1 Planteamiento del problema**

Junto con el descubrimiento del arte rupestre prehistórico y su reconocimiento en el ámbito científico a finales del siglo XIX, cada vez más se hace necesaria una forma de conservación de dicho patrimonio cultural. Anteriormente se utilizaban diferentes técnicas, como la documentación a mano (o calco a mano) y la fotografía, pero ahora surge la inquietud de brindar una documentación rigurosa y exhaustiva, que se ajuste cada vez más a los modelos reales. Actualmente no se tiene un consenso ni unanimidad a la hora de concebir una forma o una manera de estudiar y documentar los conjuntos rupestres. Ahora bien, teniendo en cuenta las mejoras introducidas por la fotografía, la documentación de

---

<sup>1</sup> <http://www.goit.cl/sentisculpt.html>

<sup>2</sup> <http://scann3d.smartmobilevision.com/>

yacimientos rupestres se enfrenta a la generación de la tecnología informática, de los modelos 3D y de las nuevas perspectivas y problemas que ello conlleva.

Los modelos 3D son la presentación matemática de cualquier objeto tridimensional, utilizando un software especializado se pueden generar dichos modelos de casi cualquier objeto, la generación del mismo depende de la parte exterior del objeto, duplicando sus cualidades, tamaño, forma, textura, color etc, por lo cual se convierte en una excelente forma de conservar y documentar los yacimientos rocosos. Aunque existen grandes problemas entorno al análisis de los datos generados por los programas, debido a que aún no existe un método definido para hacer la comparación de modelos 3D. Teniendo en cuenta esto: ¿Cuál será la metodología adecuada para definir qué programa genera los mejores resultados frente a la reconstrucción de un Modelos 3D?

## 1.2 Justificación

El arte rupestre es una de las representaciones más complejas de pensamiento humano, por lo cual, ha sido y sigue siendo objeto de una gran atención por parte de la comunidad científica internacional como del público en general. En los últimos años se han realizado diversos proyectos encaminados a valorar esta rica herencia cultural, la preservación de este patrimonio plantea todavía muchos interrogantes y demanda vincular la investigación y documentación del arte rupestre. En el caso de las pinturas la conservación dependen directamente de las materias primas (pigmentos) y los factores medio ambientales a los cuales está expuesta la roca.

Retomando lo planteado en la “*Política para promover la apropiación social del patrimonio a través de la participación comunitaria*”<sup>3</sup> se entiende que el termino *patrimonio cultural* aquellos bienes y manifestaciones que constituyen el legado que se transmite de

---

<sup>3</sup> Política para promover la apropiación social del patrimonio a través de la participación comunitaria. En <http://www.mincultura.gov.co/?idcategoria=23394>. 2010

generación en generación. Es una herencia que fortalece la memoria e historia de una colectividad y, por ende, su identidad. En esta medida, la preservación del patrimonio cultural depende de su valoración y apropiación por las colectividades (Ministerio de Cultura, 2010). Por ello la conservación del patrimonio cultural depositado en los yacimientos rocosos de Bojacá toman un especial valor, ya que de estos yacimientos existen antecedentes documentados como en: “*Inventario de sitios con arte rupestre del Municipio de Bojacá*”<sup>4</sup>, en este trabajo se demuestra el inminente riesgo que corren este tipo de representaciones. (Ver Figura 2)



Figura 2. Aspecto de una superficie rocosa con manifestaciones pictográficas, empleada como mural para un grafiti. Foto: Mario Rodríguez, 2015

Teniendo en cuenta lo mencionado, algunos grupos han realizado la documentación de las pinturas rupestres, en la documentación es muy importante la fidelidad del modelo 3D con respecto a la del yacimiento, generando una imagen completa de la roca, que guarde relación directa con sus dimensiones, su textura, su morfología y que a su vez tenga una resolución óptima para visualizar claramente los pictogramas consignados en ella.

---

<sup>4</sup> Martínez Celis, D., Fique, S., Rodríguez Larrota, M., & Mendoza Lafaurie, S. (2015). Inventario de sitios con arte rupestre del Municipio de Bojacá, Cundinamarca (Colombia).

En el presente trabajo, se llevó a cabo la documentación de un yacimiento arqueológico con arte rupestre, utilizando los programas disponibles, tanto libres como licenciados, para la generación de un modelo 3D, para tal fin se evaluaron los aspectos técnicos de cada programa y su utilidad, así mismo se determinó la calidad en el manejo de las imágenes (obteniendo la mayor fidelidad) así como la calidad del modelo 3D generado, dicho software deberá satisfacer ciertas especificaciones definidas por la naturaleza del objeto que será digitalizado, es decir debe permitir hacer la documentación de un yacimiento rocoso. De igual manera, se utiliza un método práctico que sea idóneo para contrastar la información de cada programa y así determinar cuál de ellos ofrece los mejores resultados y posteriormente se elaboró un instructivo que permitirá a cualquier arqueólogo documentar con modelos 3D utilizando el programa seleccionado.

A diferencia de la fotografía, el modelado 3D de yacimientos rupestres revela, parámetros que no habían sido tenidos en cuenta, características que varían con el ángulo de observación, como la superficie, la textura, la profundidad o un trazo, el modelado 3D de una roca permite a su vez no solamente ver los pictogramas sino que proporcionan información, acerca del lienzo (para este caso la roca) que utilizaron quienes los plasmaron allí. Por otro lado, un modelo 3D hará que sea posible calcular el volumen, el área de superficie y el centro de masa de los yacimientos arqueológicos, lo cual aportaría más información para realizar una documentación completa, de la que se podría hacer utilizando métodos únicamente fotográficos. Al final de este trabajo se verá la diferencia entre la documentación realizada con técnicas ya conocidas y la documentación por medio de programa de generación de modelos 3D escogido.



### **1.3 Antecedentes**

#### **Arte Rupestre.**

El arte rupestre es una de las representaciones humanas que trasciende las barreras del tiempo y del espacio, debido a que se encuentran dispersas por todo los lugares del mundo y en todas las épocas, desde hace al menos 40.000 años, los diferentes grupos humanos con costumbres y arraigos culturales muy diferentes, con otros propósitos, técnicas y formas de expresión, plasmaron grabados y pinturas sobre cientos de miles de soportes pétreos. Es por ello, que el arte rupestre es una de las manifestaciones más extendidas e interesantes del ser humano. La lista de Patrimonio de la Humanidad asume este hecho con la declaración de 20 sitios representativos del arte rupestre mundial, repartidos por 19 países y cinco continentes diferentes. (López-Mencheró Bendicho, 2011), Por otro lado en gran parte de América se llevaron a cabo este tipo de actividades en los yacimientos rocosos tales, presumiblemente desde los inicios de su poblamiento hace alrededor de 30 o 20 mil años (AP<sup>5</sup>) hasta tiempo después de la invasión europea. Por lo tanto, grabar y/o pintar inscripciones en los yacimientos rocosos, se pueden considerar como una tradición común de los pueblos nativos, tradición que, fue largamente extendida en el espacio y el tiempo, la cual vino a interrumpirse con la Conquista europea llevada a cabo desde el siglo XVI. El aspecto material de dichas expresiones del pensamiento y el lenguaje de los nativos americanos han pervivido hasta el presente gracias a una suerte de factores –intrínsecos y extrínsecos– que fueron propiciadas principalmente por las características medio ambientales las cuales garantizaron su conservación.

Es por eso que en las naciones americanas desde hace aproximadamente 100 o 200 años, se empezó a reconocer el arte rupestre como una evidencia del pasado, como una

---

<sup>5</sup> Es decir, antes de 1950 cuando se inició la datación con Carbono 14

representación cultural que nos acerca al pensamiento indígena y es a través de su estudio que se está haciendo posible vislumbrar la riqueza y complejidad de los yacimientos encontrados a lo largo y ancho del territorio americano, el cual pretendió ser silenciado, desplazado, despreciado u olvidado durante siglos. La situación no es diferente en Colombia en donde no se ha iniciado el proceso que implemente políticas destinadas ni siquiera a su descubrimiento, existe a escala internacional, un conjunto complejo de grupos (ARARA, CAR CIARU, IFRAO, SIARB, CAMUNO, entre otros), instituciones que tienen de años atrás experiencias en el registro, estudio y conservación de zonas rupestres en sus respectivos países (Muñoz, 1999), y es allí (en el ámbito internacional) en donde se evidencia que en los congresos de Americanistas, las reuniones WAC<sup>6</sup>, los encuentros de los equipos de trabajo organizados por la federación internacional de organizaciones (IFRAO), los simposios dedicados expresamente al estudio del arte rupestre, además de los foros permanentes especializados en el tema en Internet y las *páginas de web* producidas en distintos países, muestran el alto desarrollo, en contraste con la precaria situación en que se encuentran estas manifestaciones en el país. (Muñoz, 1999)

Las primeras referencias que se tienen sobre el arte rupestre en Colombia datan de hace aproximadamente 150 años, las primeras investigaciones fueron las de la comisión corográfica en donde era secretario M. Ancízar, 1853; T. Uricoechea, 1854; J. Isaacs, 1984-85 y V. Restrepo, 1851; son estos cronistas quienes se interesan en describir algunos sitios (Bosa, Soacha,) y así dar comienzo a la exploración de los yacimientos rupestres en el territorio Colombiano.

---

<sup>6</sup> El Congreso Arqueológico Mundial (WAC por sus siglas en inglés) es una organización no gubernamental, organización sin fines de lucro y es la única organización arqueológica con representación global elegida. La membresía está abierta a arqueólogos, gestores del patrimonio, estudiantes y miembros del público

Con Miguel Triana, Pérez de Barradas, Núñez Jiménez y Cabrera Ortiz, se inician los primeros trabajos de registro y estudio de estaciones rupestres fundamentalmente en el altiplano cundí-boyacense. A pesar de que cada uno de estos autores advirtió que su trabajo era precario, el país y las instituciones dieron por hecho que el trabajo ya estaba concluido y que se conocía todo lo que tiene el territorio en arte rupestre (Muñoz,1999)

Ahora bien, a partir de 1970 se da otra etapa en la investigación rupestre del altiplano Cundiboyacense y es en esas exploraciones de GIPRI, en las que se determina la gran diferencia entre los materiales documentados y los existentes además de la presencia de cientos de sitios y miles de rocas existentes, que no habían entrado en los informes preliminares. Así mismo se pudo constatar que ninguna de las representaciones es fiel a la original.

De esta manera quedó en evidencia que la documentación hecha con anterioridad carecía del método de registro adecuado, las características de esta metodología quedan muy bien delimitadas en uno de los documentos consultados, en este se establece que:

“De igual forma, la ausencia o ligereza en el trabajo de campo conlleva a errores o interpretaciones superficiales. Estos apresuramientos se advierten en los estudios del arte rupestre cuando se fragmentan los murales o se privilegian algunos motivos sin reconocer y documentar todo el contexto de las pictografías o los petroglifos del yacimiento en general. Esto mismo se nota en la interpretación que intentan determinar, por analogía, el lugar cultural en el que se encuentran tales vestigios pictóricos. Así, las tipologías estilísticas, la libre asociación formal o una interpretación que privilegia lo ritual y religioso, son maneras

históricas problemáticas que no se detienen previamente en una documentación y registro adecuados, sino que apresuran una explicación.”<sup>7</sup>

Resulta un error característico de quienes hacen documentación de yacimientos rupestres, el querer desarrollar un sistema de explicaciones acerca de los pictogramas, al igual que sin ningún tipo de argumento le dan importancia a un trazo más que a otro. Ahora bien, esto hace parte del panorama nacional, es precisa una visión mucho más enfocada en el campo de acción sobre el cual se basa este trabajo.

### **Especificaciones del sitio.**

Bojacá es un municipio ubicado a las afueras de Bogotá y en él se hallan grandes bloques y abrigos rocosos que han sido estampados con pinturas rupestres precolombinas. A pesar de la importancia de los yacimientos, ya que representan un sitio de interés cultural, turístico y además convertido en símbolo de la identidad del pueblo, para la apertura de sendero y su respectivo quiosco no se contó con el permiso del ICANH para realizar las obras de adecuación del aula, como exigencia de los planes de manejo ambiental, en terrenos con potencial arqueológico; debido a esta situación sus pinturas rupestres están completamente abandonadas y siendo presa del grafiti y de la degradación por factores antrópicos debido a la proliferación de fogatas en los alrededores de los yacimientos.

Ahora bien, se debe tener en cuenta que, una de las necesidades primordiales dentro de la documentación de los yacimientos rupestres, es la conservación, el municipio de Bojacá y por lo tanto debe implementar una estrategia que permita la identificación de su patrimonio cultural como insumo para diseñar las herramientas que permitan garantizar la protección y salvaguarda del mismo, con el fin de ponerlo en valor y evitar impactos no deseados cuando

---

<sup>7</sup> Muñoz, G., Trujillo, J., Rodríguez Martínez, C. A., & Riveros, N. (2014). Arte rupestre en Choachí. Informe final Agosto 2014.

se tracen proyectos de desarrollo en los territorios y las comunidades involucradas. (Martínez, 2015)

Por ello no basta con tener un trabajo descriptivo que exponga con delicadeza y detalle los aspectos más singulares de una roca (morfología, dimensiones) y con ella represente los detalles de cada uno de los pictogramas consignados en ella por medio de un modelo 3D de alta resolución. Se debe tener en cuenta que si bien los modelos 3D son una aproximación bastante real, no pueden desplazar a la roca como objeto primordial de investigación. Es por esto que no es suficiente con desarrollar estrategias de registro y documentación no invasivas, sino que a su vez es fundamental cuidar el original y crear diversas estrategias para que yacimientos con arte rupestre sean conservados. De igual manera resulta irresponsable el investigador que en la documentación de los SAR no se detenga a reseñar las alteraciones y los procesos de deterioro a los cuales están expuestos y se ocupe únicamente en reproducir los “dibujos”.

Teniendo en cuenta que la conservación es el factor primordial en este trabajo, una vez hecho el inventario del estado de los Sitios con Arte Rupestre del Municipio de Bojacá, igualmente se hizo necesario conocer de antemano los antecedentes de investigación del arte rupestre, con el fin de obtener un panorama o estado del arte de los datos y conocimientos que dichas investigaciones pueden aportar a la contextualización de las particularidades de las rocas del sector.

Teniendo en cuenta el panorama nacional y más precisamente el estado del arte rupestre en el municipio, se hace necesario conocer las características del afloramiento rocoso con arte rupestre. Para ello se tiene en cuenta la investigación realizada en el 2015 llamada "Inventario de sitios con arte rupestre del Municipio de Bojacá, Cundinamarca (Colombia)"

en ella se precisan los detalles de la roca. (Se toma literal del texto debido a que es la única documentación que se tiene sobre la misma) <sup>8</sup>

***“Sector Alto de la Cruz (vda. Cubia)***

***Cantidad de SAR<sup>9</sup>: 6***

***Modalidad: Pintura rupestre en rojo ocre.***

***Localización:*** A 2.9 Kms. al sur-orienté del casco urbano de Bojacá, por carretera destapada que conduce hacia el sector de Mondoñedo (vía a la Mesa o Soacha), en el predio conocido como Alto de la Cruz, cerca de un cruce de caminos al costado nororiental de la llamada plazuela de Cubia.

***Altitud media:*** 2.630 msnm

***Área aproximada:*** 14.000 m<sup>2</sup>

***Propietario:*** Atilio Di Gregorio

***Observaciones:*** Este predio colinda al norte con el sector de El Castillo. Se identifica a la distancia por la instalación de algunas torres y antenas, una de las cuales está dispuesta sobre una de los SAR documentados. Al parecer en este funcionó por un tiempo un taller de ensamblaje de torres de energía.

*Los murales de los seis SAR de este conjunto se encuentran en relativo buen estado de conservación, es decir los factores naturales han incidido pero no mayormente los antrópicos (no hay grafitis), y a la fecha el predio se encuentra entre un creciente bosque reforestado con acacias que datan de hace aprox. 15 años.*

---

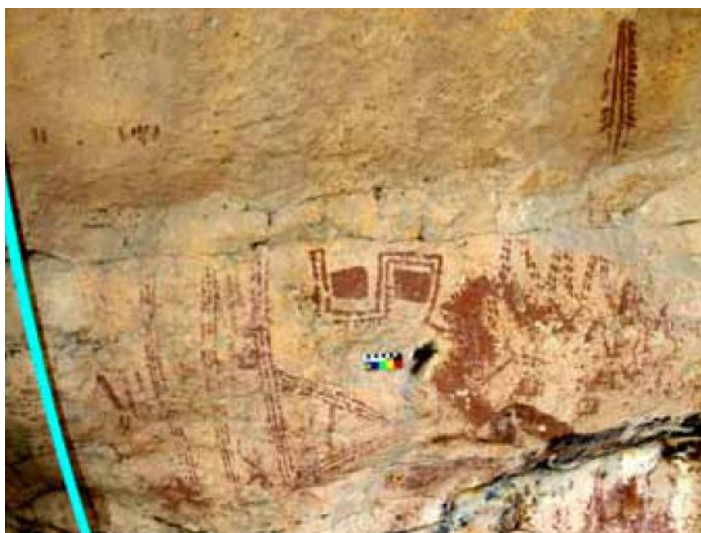
<sup>8</sup> Martínez Celis, D., Figue, S., Rodríguez Larrota, M., & Mendoza Lafaurie, S. (2015). Inventario de sitios con arte rupestre del Municipio de Bojacá, Cundinamarca (Colombia).

<sup>9</sup> Sitio con Arte Rupestre



Figura 3. Alto de la Cruz, Bojacá. Tomado de (Martínez Celis, 2015)

*Es probable que las bases de sus piedras también hayan sido presa de g.uaquería, aunque hoy no se encuentran mayores huellas, pues pudieron haber sido rellenos los huecos, como sucedió con los que se llevaron a cabo durante la excavación arqueológica de María Victoria Palacios (1972), quien excavo 8 trincheras en la zona plana y más baja del predio y en donde se hallaron siete esqueletos y algunos vestigios líticos y huesos de animales que parecen corresponder a cazadores-recolectores. Los murales y motivos rupestres de este sector resaltan por su profusión y nitidez, pues cobijan grandes áreas sobre amplias y muy lisas paredes rocosas. Los motivos son en su mayoría lineales, compuestos por combinaciones múltiples de formas geométricas básicas que forman rombos, zigzags, meandros, laberintos y muchos otros. Se destacan también conjuntos de puntos. Aquí también se encuentran algunos ejemplos de interacción compositiva entre los diseños pintados y las formas naturales (grietas) de la roca. En el techo de una de las rocas, Quintana de Afanador (2002) identifica una serie de oquedades que considera “metates”. Sin embargo, en este proyecto constatamos que se trataría de accidentes naturales, pues su superficie es muy irregular y no presentan huellas de haber sido trabajadas por abrasión ni pulimento.”*



*Figura 4. Grupo de pinturas rupestres, Alto de la Cruz, Bojacá.  
Foto: Diego Martínez Celis, 2015*

### **Características típicas del Arte Rupestre en Bojacá.**

El altiplano Cundiboyacense posee características enmarcadas por el territorio y la cultura, estas determinan los rasgos de arte rupestre en Bojacá, estos rasgos que lo rodean y que lo relacionan o insertan dentro de lo que sería una tradición cultural común a todos los yacimientos rocosos de la zona. En la documentación que se encontró sobre los yacimientos rupestres de esta zona, se enfatiza que esta tradición cultural se caracteriza por expresarse, a través de pinturas realizadas –principalmente– con base en pigmentos rojo ocre o variaciones de este hacia el amarillo, naranja o rojo violáceo, así mismo que no se descarta que también se hayan utilizado pigmentos de otros colores (Blancos, negros) los cuales habrían desaparecido por la acción centenaria de diversos factores de alteración naturales y antrópicos.

### **Modelado 3D Y Fotogrametría.**

Las técnicas digitales en 3D han sido utilizadas como una herramienta cada vez más habitual en la documentación del Patrimonio Histórico y Cultural, hoy en día estos datos son utilizados por diversos actores del sector, no sólo por los investigadores y restauradores, sino también como elementos para la difusión de las obras de arte, los yacimientos arqueológicos



y los monumentos históricos al público general (Jiménez, J. G., 2012). Una vez que se ha determinado la roca (Ver Figura 5) y sus características, se hace una búsqueda de los programas, tanto libres como licenciados, que posibiliten crear un modelo 3D de la misma.



Figura 5. Panorámica del objeto de estudio. Alto de la Cruz, Bojacá. Foto: Diego Martínez Celis, 2015.

Desde hace tiempo se utilizaba la técnica de calco directo (lo cual necesitaba contacto directo con el yacimiento rupestre) y/o el dibujo a mano alzada para realizar la documentación de un yacimiento con arte rupestre. Posteriormente fue la fotografía la que tomó su lugar, siendo un método de mayor calidad y no tenía la necesidad de tener contacto directo con la roca (lo cual ayuda a la conservación de la misma). Es aquí en donde se desarrolla la técnica denominada como Fotogrametría, el uso de esta técnica hace posible generar modelos 3D muy fiables sin la necesidad de usar herramientas costosas como el escáner láser (LiDAR) o el modelado 3D. La técnica permite, a partir de un conjunto de fotografías detalladas, desarrollar un modelo 3D de la realidad. (Caro, J. L. 2012).

Un ejemplo claro del uso de esta técnica en la conservación de bienes considerados patrimonio nacional Español es el portal Museo3D<sup>10</sup>, así como Rome MVR Time Window dirigida a turistas y exploradores la cual es una aplicación que a partir de modelos 3D, proporciona información arqueológica *in-situ* en Roma especialmente en la zona del Coliseo. Ahora bien, teniendo en cuenta el ámbito de la fotogrametría se encuentra el proyecto Photo

---

<sup>10</sup> <http://www.museo3d.faico.org/Home/Museo3D>

tourism (Snavely, Seitz, 2006) que realiza reconstrucciones 3D a partir de fotografías tomadas por turistas y recogidas en Google Picassa o Flickr.

La fotogrametría es una técnica que permite generar modelos 3D con dos ventajas:

- Tiene un costo operativo menor que el propio modelado 3D, con herramientas del tipo 3DStudio MAX, Autocad, Blender o el uso de escáneres láser, en este caso solo se necesitan fotos tomadas la manera correcta.
- De igual manera esta técnica brinda la posibilidad de alcanzar un gran realismo ya que la texturización se realiza con fotografías y, por tanto, se obtiene el modelo directamente (usando algoritmos) de la fotografía digital.

Y es aquí en donde la fotogrametría adquiere una relevancia especial, ya que es una técnica que permite realizar medidas 3D y obtener volúmenes a partir de fotografías. Esta técnica (la denominada fotogrametría aérea) ha sido tradicionalmente empleada en la creación de mapas y su correspondiente levantamiento en 3D usando modelos digitales del terreno DEM (*Digital Elevation Model*). Sin embargo, hoy en día, el aumento de potencia de sistemas y la mejora en los algoritmos de reconocimiento de patrones en imágenes digitales ha hecho posible que esta técnica se incorpore con más fuerza para la generación de modelos tridimensionales. Esta última posibilidad es la que se conoce como fotogrametría de alcance corto (*close range photogrammetry*). (Caro, J. L. 2012).

Actualmente, usando la fotografía digital se puede calcular una estimación de la posición de la cámara respecto al objeto real y obtener mediante transformaciones matemáticas, la posición relativa de sus puntos en un sistema 3D (Longuet-Higgins, 1981).

Con esto no se desea ignorar otro tipo de técnicas de modelado 3D, tecnologías como LiDAR (*Light Detection And Ranging*) que, junto al amplio abanico de escáneres, pueden generar una nube de puntos de altísima calidad y precisión, tanto en entornos cerrados y

patrimonio mueble como en la reconstrucción de paisajes. Un buen ejemplo de reconstrucción del paisaje se encuentra en el entorno de Stonehenge realizado por Wessex Archaeology (Wessex Archaeology, 2007).

Posteriormente en este trabajo se podrá evidenciar porqué las aplicaciones que utilizan la reconstrucción de los yacimientos arqueológicos basándose en fotografías resultan mucho más eficientes que otros métodos, también se puede agregar que la técnica fotogramétrica, por tanto, ya está siendo usada para la documentación desde un punto de vista científico del patrimonio arqueológico, histórico y artístico (Wang & Ahmad, 2002) siendo una competencia a técnicas más costosas.

Por ejemplo para una reconstrucción basada en LiDAR se necesitaría un equipamiento láser. En cambio, usando técnicas fotogramétricas solo son necesarias las fotos de una cámara digital y, si se desea algún sistema de geo-referenciación. Esta técnica actualmente está comenzando a gozar de aceptación, tanto para la difusión en medios digitales del patrimonio, como en la documentación de yacimientos arqueológicos puesto que ofrece una fotografía aumentada en su dimensión para ser usada como textura en los modelos generados mediante fotogrametría. Ejemplos interesantes de esta aplicación se encuentran en importantes yacimientos como Catal Hoyuk (Hadow, 2012) o Perdigones (Suarez, Caro, Márquez, Mata, & Jiménez, 2012). En este último se han conseguido importantes resultados en excavaciones en extensión complementando las técnicas de documentación y con unos resultados excelentes en cuanto a su documentación y difusión.

La implementación de los programas requirió de varias horas dedicadas al aprendizaje y manipulación, con el fin de obtener una experiencia mayor en su manejo y en la creación de cada uno de los modelos 3D En el capítulo de Desarrollo encontrará mayor información sobre el software utilizado y sobre su funcionamiento.

## **1.4 Objetivos**

### **Objetivo general.**

Comparar cuál software de generación de modelos 3D permite documentar y digitalizar un yacimiento arqueológico con arte rupestre, con el fin de elaborar un modelo 3D del afloramiento rocoso.

### **Objetivos específicos.**

- Hacer un estado del arte del software (tanto licenciado como libre) disponible que permita generar modelos 3D con las particularidades intrínsecas de la roca.
- Elaborar un procedimiento práctico capaz de contrastar la información de cada software para poder determinar cuál de ellos genera los mejores resultados.
- Elaborar un instructivo con la metodología adecuada para hacer la documentación total del yacimiento rupestre haciendo uso de la herramienta escogida.

## **1.5 Delimitaciones**

Las características del bloque errático o de un afloramiento rocoso que se va a documentar y a digitalizar son: Yacimiento rupestre ubicado en el municipio de Bojacá, a unos 40 Km de Bogotá, afloramiento rocoso de grandes dimensiones y alteraciones naturales. Debe tenerse en cuenta que no existe un criterio de similitud universalmente aceptado. En este trabajo se aborda una metodología cualitativa que permita evaluar los modelos por medio de la experiencia y de la observación y de esta manera escoger cual de todos los programas puestos a prueba generan los mejores resultados.

## **1.6 Aportes**

Los aportes de este trabajo son varios, el primero es la creación de un listado de los programas existentes (tanto libres como licenciados) que permitan la generación de modelos 3D, asimismo otro de los aportes de este trabajo es la evaluación cualitativa de dichos programas, la cual permite la documentación de sus alcances, sus límites, las fortalezas, las debilidades así como las herramientas de cada uno de los programas para generación de modelos 3D posee.

El programa permitirá generar modelos 3D de yacimientos rupestres, modelos que podrán aportar información necesaria para realizar una documentación detallada, información con la cual no se puede contar haciendo únicamente una documentación fotográfica, si bien este no es el primer trabajo de este tipo en el mundo, si es el primero de su clase en Bojacá.

## **2. Marco conceptual**

En este capítulo se definen varios conceptos importantes, como el tipo de soporte rocoso encontrado en Bojacá, los factores de degradación de los yacimientos rocosos con arte rupestre, el problema de la comparación de los modelos 3D generados y la metodología que se utilizó al momento de comparar el funcionamiento del software y las razones por las cuales se privilegió al análisis cualitativo de modelos 3D sobre el análisis cuantitativo, estos conceptos resultarán de utilidad para el seguimiento del resto de los capítulos.

### **2.1 Conceptos generales**

#### **Tipos de soporte rocoso.**

Todos los sitios visitados con pinturas y/o grabados corresponden con abrigos rocosos o bloques de arenisca, propios del municipio de Bojacá. Estos se caracterizan por aflorar sobre la superficie con sus paredes lisas y presentar fuertes rugosidades en sus techos, debidos a la presencia de matorrales y de todo tipo de vegetación. Los sitios con grabados parecen corresponder con otro tipo de formación geológica, pues son bloques erráticos más pequeños y de superficies irregulares y menos lisas, aunque se evidencia la presencia de sales y del deterioro por el paso de los años sobre la roca.

#### **Modalidad, pigmentos y técnica de aplicación.**

Dentro de las particularidades de los sitios que poseen arte rupestre se encontró que la pintura es de color rojo ocre, que esta fue aplicada sobre las paredes más lisas, evitando los techos de las rocas y/o las partes más rugosas y para ser más específicos se escogió el panel frontal de la roca el cual proporciona un gran lienzo para hacer el arte rupestre.

### **Sales y mineralización de la superficie.**

En los yacimientos rupestres es normal encontrar en las paredes sales, que pueden deteriorar el estado de los pictogramas. Debido a que las sales hacen parte de su estructura natural contenida en los poros microscópicos o en forma de solución y cuando los niveles de humedad son elevados estas emergen y se dispersan por toda la roca. Esto representa un gran problema debido a que las sales se cristalizan, manchan y/o distorsionan los motivos rupestres. Pero en otros casos, las alteraciones pueden llegar a ser complejos procesos de deterioro de los materiales de composición del soporte pétreo y de las mismas superficies pictóricas, pues se generan cambios físico-químicos que comprometen la estabilidad de las estructuras.

En las piedras de Bojacá es muy común encontrar presencia de sales y procesos de deterioro asociados a las mismas, en los diferentes conjuntos o abrigos. Estas pueden estar determinadas por las características de los suelos y las condiciones atmosféricas que presenta esta región de la Sabana de Bogotá. El municipio se caracteriza por la presencia de abundantes bancos de niebla, durante casi todo el año, además de periodos de alta exposición solar, lo que genera contrastes bruscos entre humedad y sequías, propicio para la disolución de sales y la re cristalización.

### **Iconografía.**

En la roca que se escogió para generar el modelo 3D se encontró gran cantidad de motivos rupestres de tipo “abstracto”, en el sentido de que no parecen representar objetos concretos del mundo, la naturaleza o cultura material de los antiguos pobladores del territorio. Son comunes las figuras lineales de rombos, zigzags, meandros, círculos, triángulos y un sin fin de combinaciones geométricas. De igual manera se encuentran líneas en todos los sentidos con pequeñas agrupaciones de puntos, manchas indefinidas que podrían ser

intencionales o producto de escurrimientos o migraciones posteriores del pigmento sobre la superficie pétrea.

### **Modelado 3D.**

Existen diferentes “visiones” de los Modelos 3D, desde un punto de vista técnico el modelado 3D es un grupo de fórmulas matemáticas que describen un "modelo" en tres dimensiones, es decir su ancho, su alto y su profundidad, desde un punto de vista “espacial”, un modelo en 3D es una representación esquemática visible a través de un conjunto de objetos, elementos y propiedades que, una vez pasan por un proceso de análisis y procesamiento (renderización), se convertirán en una imagen en 3D o una animación 3d.

En general, los modelos 3D representan objetos tridimensionales por medio de una colección de puntos en el espacio 3D, conectados por varias entidades geométricas tales como triángulos, líneas, superficies curvas, etc. Siendo una colección de datos (puntos y otro tipo de información), los modelos 3D pueden ser hechos a mano, a través de algoritmos o por medio de métodos de escaneo.

Los objetos 3D pueden representar una gran variedad de objetos, hay tres formas populares de representar un modelo:

- **Modelado Poligonal:** Son puntos en un espacio 3D, llamados vértices, están conectados por medio de “alambres” para formar un “*Polygonal mesh*”. Muchos de los modelos 3D hoy en día están contruidos como modelos de “*Polygonal mesh*”, porque son flexibles y porque pueden ser renderizarlos muy rápido. Sin embargo, los polígonos son planos y solamente se pueden aproximar a superficies curvas usando varios polígonos, entre mayor sea la cantidad de polígonos usados, mayor será la resolución del modelo.



- **Modelado de curvas:** En este tipo de modelado las superficies están definidas por curvas, las cuales son influenciadas por la ponderación del control de puntos. La curva sigue (pero no necesariamente interpola) los puntos. Incrementar el peso de un punto va a enviar la curva más cercana a ese punto.
- **Escultura digital:** Aunque todavía es un método bastante nuevo para modelar, la escultura digital en 3D se ha vuelto muy popular en sus pocos años de existencia. Actualmente hay 3 tipos de esculpido digital: Desplazamiento, el cual es el más usado entre aplicaciones en este momento, volumétrico y Tesselación digital. El "desplazamiento" usa un modelo denso y locaciones de vértices para ver la posición de los vértices a través de un mapa de 32bit que almacena las ubicaciones ajustadas. La volumétrica que se basa libremente en Voxel's tiene capacidades similares como el desplazamiento, pero no sufre de polígonos forzados cuando no hay suficientes polígonos en una región para lograr una deformación. Tesselación dinámica es similar a Voxel pero divide la superficie usando la triangulación para mantener una superficie lisa y permitir detalles más finos. Estos métodos permiten una exploración más artística como el modelo tendrá una nueva topología creada más de una vez las formas de los modelos y posiblemente detalles han sido esculpidos. La nueva malla por lo general tienen la información original de alta resolución de la malla transferidos en datos de desplazamiento o datos de los mapas normales si es para un motor de juego.

### **Problemas con la comparación de Objetos 3D.**

Comparar la similitud de dos modelos 3D es siempre tema de discusión, debido a que los parámetros de evaluación pueden variar dependiendo del ente investigador, por ello es importante mencionar, que no existen criterios universales para determinar relaciones de semejanza entre los modelos 3D. Pueden sin embargo observarse relaciones de similitud

entre los objetos estableciendo relaciones de patrones de medida, aunque de acuerdo con Ortega-González<sup>11</sup>, el ser humano emplea múltiples criterios y mecanismos para observar dichas relaciones, inclusive sin rigor alguno, que resultan completamente desconocidos para la ciencia.

Para los seres humanos, resulta primordial relacionar cosas, establecer criterios verídicos por medio de los cuales pueda comparar cosas o situaciones de su entorno. El problema de la similitud puede ser abordado desde dos diferentes enfoques de investigación, uno de los enfoques es el enfoque cuantitativo, por medio del cual se pueden comparar las medidas del modelo 3D versus el objeto real, parte de la idea de realizar la comparación geométrica directa o bajo una representación equivalente de los dos objetos, y por el otro lado está el enfoque cualitativo en el cuál se extraen las características principales del objeto y son comparadas con las del objeto real.

A diferencia de los procesos de comparación y análisis de imágenes, en modelos 3D no existe un concepto bien definido de similitud. Se puede construir una aproximación mediante el concepto de “cubo de datos”, pero si bien puede resultar muy útil el gasto computacional que se requiere es enorme y demasiado complejo, debido a que la cantidad de información contenida en cada punto del cubo es enorme.

Es decir que, para un modelo de muy baja resolución, con un tamaño de  $10 \times 10 \times 10$ , la combinación de los valores de presencia (1) y de ausencia (0), en cada celda resulta ser  $((2^{10})^{10})^{10}$ , lo cual es equivalente a  $2^{1000}$ , lo cual representa un número enorme comparado con el tamaño del objeto.

---

<sup>11</sup> ORTEGA GONZALEZ, E. V. (2008). *Una técnica para el análisis de similitud entre imágenes* (Doctoral dissertation).

### **Técnicas de comparación.**

Los criterios de comparación permiten tener una función distancia, el cuál es un componente fundamental para la función de disimilitud. Esta función es útil para agrupar objetos analizados en un espacio de medida y mediante complejos algoritmos hallar la diferencia entre las distancias equivalentes. (Ver Anexos Técnicas de Comparación Cuantitativas)

### **Causas de degradación de los yacimientos.**

Teniendo en cuenta los principales actores que influyen en la degradación de los yacimientos rocosos, se pueden clasificar los principales problemas de conservación de las pinturas rupestres de la siguiente manera:

- Causas naturales: Estas son causadas por procesos de degradación natural. Las principales causas naturales de degradación del arte rupestre estarían ligadas con las formaciones de carbonato cálcico (“mal blanco”), colonias de microorganismos algas y líquenes (“el mal verde”), desprendimientos de bloques o lajas, aparición de costras estalagmitas, corrientes de aire o agua... (Moure, 1999).
- Causas antrópicas: Estas hacen alusión a los procesos de degradación provocados por el hombre. Las principales causas antrópicas de degradación del arte rupestre estarían ligadas con las inscripciones o pintadas modernas (Ver figura), el expolio, es decir arrancar mecánicamente fragmentos de pared con pinturas y también por las obras de acondicionamiento turístico (modificaciones en la entrada y circulación interior, sistemas de iluminación artificial...) (Moure, 1999). Todos estos problemas, aunque pudiera parecer paradójico, han servido de fuente de inspiración para realizar este trabajo.



Figura 6. Ejemplo de grafiti sobre yacimiento rocoso. Foto: Mario Rodríguez L, 2015

## 2.2 Metodología

En este aparte se describen los aspectos metodológicos que conforman la propuesta, así mismo se establece un marco teórico sobre el cual se crea una metodología “mixta” que permita la evaluación de los programas, es decir una metodología que permita hacer un análisis cualitativo de los programas pero que igualmente posibilite la presentación de resultados de manera cuantitativa y gráfica, lo cual permitirá un mayor entendimiento de la información recolectada. Al igual se describen los “*Criterios de Comparación*” esenciales para la comparación del software, criterios que se tornan imprescindibles al momento de la comparación y evaluación del mismo.

A pesar de tratarse de un trabajo enfocado hacia el arte rupestre consignado en las rocas, posee contribuciones que son el resultado de los aportes de las ciencias básicas y de los actuales desarrollos tecnológicos para documentar los yacimientos con arte rupestre, por lo tanto el modelo metodológico debe incluir sin duda la documentación y recolección de la información, al igual debe ser una entidad teórico reflexiva, que incorpore y de cuenta de las

inconsistencias de los trabajos anteriores. No es un simple punto de vista, sino que debe recoger y organizar todos los puntos de vista en la historia del objeto (Ver Conceptos Generales). Lo metodológico debe permitir entonces discriminar las cualidades más importantes en los programas de generación de modelos 3D así como los resultados de la documentación de yacimientos por medio de los mismos y de la posterior caracterización de cuál de ellos genera mejores resultados. Para unificar estas cualidades es indispensable percibir la historia del objeto y de las técnicas utilizadas para llevar a cabo la comparación de modelos 3D, pues la reflexión sobre el pasado permitirá relativizar los supuestos de la tradición y mostrar en toda su simplicidad los nuevos criterios producto de un desarrollo reflexivo continuo.

Dentro de la documentación consultada, en “*Comparison of 3D scanning and 3D modelling of a workplace from various aspects*”<sup>12</sup>, se encuentra una primera aproximación a la metodología de evaluación de los programas, la cual será la metodología guía para llevar a cabo la comparación de los programas, esta se encuentra compuesta por cinco fases:

1. *Recolección de información:* El primer paso es recolectar toda la información posible, tanto de los programas que serán utilizados, como del yacimiento arqueológico, esta información estará disponible en el Marco Conceptual.
2. *Experimentación:* En esta fase se hace las pruebas iniciales a cada programa encontrando, determinando cuales podrían servir para llevar a cabo la documentación de los yacimientos rocosos. Dicha información la encontrará en el capítulo Desarrollo, en dónde se especificarán cuales herramientas se utilizaron y cuáles son sus características principales.

---

<sup>12</sup> Bures, M., & Polcar, J. (2016, December). Comparison of 3D scanning and 3D modelling of a workplace from various aspects. In *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2016 IEEE International Conference on* (pp. 306-310). IEEE.

3. *Creación del Modelo 3D.* Como primera medida se debe generar en un modelo 3D de un objeto que este a la mano y que sea fácilmente utilizado con cada programa a fin de generar los mejores modelos posibles. En este documento se operarán dos modelos 3D, uno del yacimiento rocoso y uno de la rana en relieve ubicada en el bloque C de la Universidad Pedagógica Nacional, el objetivo de la generación de este modelo es de comparación de resultados debido a que no todas las aplicaciones estuvieron en la capacidad de generar el modelo de la roca.
4. *Criterios de comparación.* Diseño y prueba experimental de una metodología de comparación, la cual permitirá organizar las representaciones de los modelos 3D, dicha metodología analizará cada uno de los aspectos relevantes de los programas, para hacer un análisis comparativo con cada uno de ellos y así determinar cuál es el mejor. Estos criterios fueron establecidos por medio de la lectura de la documentación encontrada y por medio de la experimentación con los programas.
5. *Mejoras y Re-Evaluación.* Implica sugerencias para mejorar, es decir tomados los primeros modelos, deben detectarse ciertos fallos a la hora de tomar las fotografías y/o de escanear los objetos.

Una vez que se tiene claro el panorama general y la ruta a seguir, se deben establecer los “*Criterios de comparación*” para la evaluación de los programas de generación de modelos 3D, revisando la documentación se pueden encontrar en “*Criterios de Comparación*” en el artículo “*Comparison of 3D scanning and 3D modelling of a workplace from various aspects. In Industrial Engineering and Engineering Management*”<sup>13</sup>, estos criterios serán

---

<sup>13</sup> Bures, M., & Polcar, J. (2016, December). Comparison of 3D scanning and 3D modelling of a workplace from various aspects. In *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2016 IEEE International Conference on* (pp. 306-310). IEEE.

referenciados con un número entre paréntesis<sup>14</sup>, para tenerlos en cuenta al momento de generar las tablas de comparación.

Así mismo, en el artículo se exhiben dos formas de obtener los modelos 3D y de evaluarlos, éstas son el *Modelado 3D* y el *Escaneo Industrial*. En él se plantean las diferencias y se evalúan los dos escenarios en términos de tiempo y de exactitud. En la primera parte, el escaneo resulta ser mucho más eficiente que el modelado, debido a que en el modelado se tienen que tomar las medidas de todo el objeto, lo cual requiere una gran cantidad de tiempo y de una planeación clara por parte del equipo investigador para tabular todos los datos, aunque es la misma característica hace del Modelado 3D mucho más preciso.

Ahora, en dicho artículo se tiene en cuenta un “*Criterio de Comparación*” que es muy importante para el manejo de los modelos 3D, este aspecto es muy importante para la evaluación de los programas y es:

- ***Ergonomía (1)***: Se encarga de diseño de lugares de trabajo, herramientas (en este caso programas) y tareas de modo que coincidan con las características del entorno de trabajo, así como de las capacidades y limitaciones físicas y mentales de la persona, este “*Criterio de Comparación*” se tendrá muy en cuenta a la hora de evaluar los modelos, debido a que no es útil un programa que no facilite al usuario la documentación del yacimiento arqueológico, es decir que tenga que hacer uso de otras herramientas para lograr un escaneo exitoso.

En el mismo artículo se advierte sobre cuáles pueden ser otros de los “*Criterios de Comparación*” como:

---

<sup>14</sup> Se irán listando los criterios de esta manera Ergonomía (1), Tiempo de Duración(2)...etc

- **Tiempo de duración (2):** Este es uno de los aspectos primordiales en la evaluación de los programas y será utilizado más adelante en este trabajo. En la **Tabla 1** se compara la cantidad de horas utilizadas para generar los modelos mencionados en el artículo. En ambos casos el proceso se completa en 12 horas.

**Tabla 1**  
*Demanda de tiempo de la evaluación Ergonómica*

Fases	Lugar de trabajo No			
	1 Modelo	2 Modelo	3 Modelo	4 Modelo
1. Recolección de la información del lugar de trabajo (h)	2	2	0,75	0,5
2. Construcción del entorno virtual (h)	3	3,5	0,75	0,75
3. Evaluación Ergonómica (h)	3	3,5	3	3,5
4. Mejoras y Re evaluación (h)	4	3	4	3
Suma (horas)	12	12	8,5	7,75

*Tabla 1. Demanda de tiempo de la evaluación ergonómica. Tomado y traducido de: "Comparison of 3D scanning and 3D modelling of a workplace from various aspects. In Industrial Engineering and Engineering Management",*

- **Exactitud de modelos (3):** Es sin dudar, uno de los “*Criterios de Comparación*” más relevantes a evaluar, debido a que la documentación del yacimiento arqueológico debe ser lo más fiel al original. (Ver tablas de comparación).

Ahora bien, otros de los “*Criterios de Comparación*” de los programas, se pueden encontrar en “*Comparing Password Management Software: Toward Usable and Secure Enterprise Authentication*”<sup>15</sup> el autor analiza el software para llevar a cabo el PM (Password Management) desde el punto de vista del uso y hace recomendaciones respecto a su uso. El documento inicia explicando él porque cada día las compañías están generando más y más protocolos para la asignación de claves, aunque inexplicablemente eso aumenta la inseguridad de las mismas ya que los usuarios son quienes generan tales

<sup>15</sup> Arias-Cabarcos, P., Marín, A., Palacios, D., Almenárez, F., & Díaz-Sánchez, D. (2016). Comparing Password Management Software: Toward Usable and Secure Enterprise Authentication. *IT Professional*, 18(5), 34-40.



claves incurren en prácticas inseguras para generarlas y/o mantenerlas, en el artículo se catalogan dichos criterios de evaluación dentro del método de las “Cinco E” (*Efficient, Effective, Engaging, Easy to learn, Error Tolerant*). De estos términos de uso, algunos se tendrían en cuenta más adelante al momento de definir la comparación de cada programa. Los criterios son los siguientes:

- ***Eficiente***: La eficiencia se puede describir como la velocidad (con precisión) en la que los usuarios pueden completar las tareas para las que utilizan el producto. Forma en que el software utiliza los recursos disponibles. El software debe hacer un uso eficaz del espacio de almacenamiento del dispositivo así como de la conexión a internet.
- ***Efectivo***: La efectividad es la integridad y exactitud con la que los usuarios logran los objetivos especificados. Se determina mirando si las metas del usuario se cumplieron con éxito y si todo el trabajo es correcto.
- ***Atractivo***: Una interfaz es atractiva si es agradable y satisfactoria de usar. El diseño visual es el elemento más obvio de esta característica. Igualmente importante es el estilo de la interacción, que puede ir desde una simulación equivalente a un juego a un sistema sencillo de comando de menú.
- ***Fácil de aprender (4)***: Una interfaz que es fácil de aprender permite a los usuarios construir sobre sus conocimientos sin esfuerzo deliberado.
- ***Tolerancia a los errores (5)***: Un programa tolerante a errores está diseñado para evitar errores causados por interacciones con usuarios y para ayudar a los usuarios a recuperarse o superar cualquier error que se produzca.

Posterior a esto, en el artículo se hicieron encuestas para 14 estudiantes y los resultados se encuentran reflejados en la Figura 7, esta figura resulta primordial en este trabajo debido a que brinda una base sólida mediante la cual se puede hacer la comparación

de los programas y presentar los resultados de manera gráfica y que sus datos sean entendidos por el público en general.

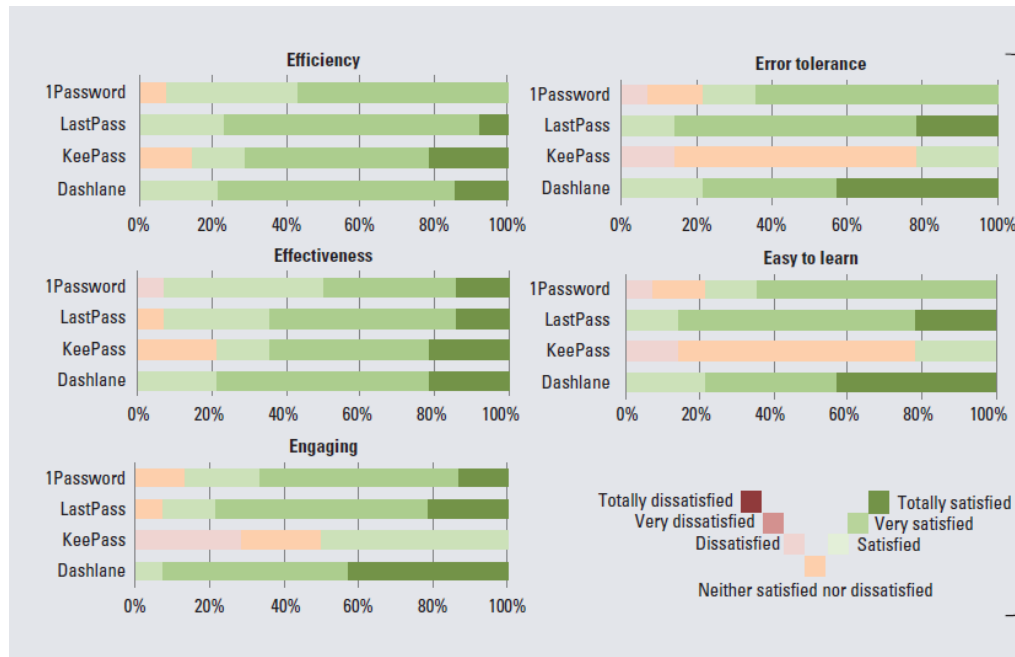


Figura 7. Evaluación de Rendimiento de las aplicaciones utilizando el Criterio de las 5 E. Tomado de: Arias-Cabarcos (2016)

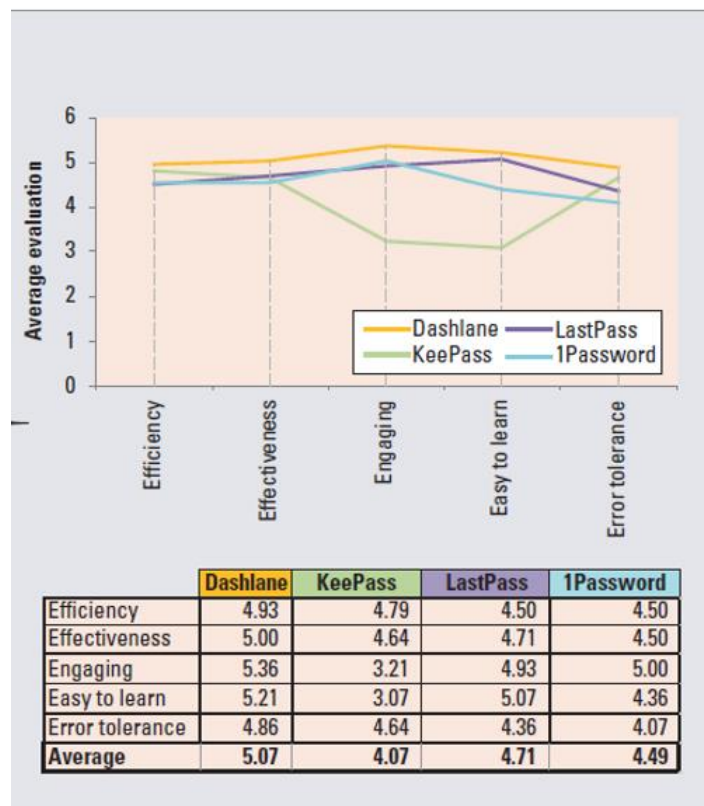


Figura 8. Gráfica comparativa Evaluación de Rendimiento de las aplicaciones utilizando el Criterio de las 5 E. Tomado de: Arias-Cabarcos (2016)

Se puede visibilizar claramente las evaluaciones para el desempeño de cada una de las aplicaciones, al final se agrega toda la información en una única gráfica (Ver Figura 8) en la cual se integra la información contenida en todas las demás, esta gráfica servirá de modelo para la generación de la gráfica de la comparación de los programas.

En el artículo<sup>16</sup> se analizaron y se compararon en términos de uso y seguridad el software gratuito, de ese análisis se pudo observar dos factores importantes, el uso es percibido positivamente por los usuarios y todas las PM's demostraron tener un entendimiento que teóricamente es seguro acorde con las recomendaciones del mejor uso. Es importante observar como es el usuario final quien compara los resultados de su evaluación y esta genera valores numéricos que permiten facilitar la comparación entre los diferentes paquetes de software.

Experimentalmente se encontró que existen otros “*Criterios de Comparación*” que no habían sido tenidos en cuenta en la documentación, lo cuales son

- ***Portabilidad (6):***
- ***Inter operatividad (7):***
- ***Valores Agregados (Otras funciones)(8)***
- ***Automatización(9)***

---

<sup>16</sup> “Comparing Password Management Software: Toward Usable and Secure Enterprise Authentication”

### **3 Desarrollo**

Este capítulo hace referencia directa a la experimentación, al uso de cada uno de los programas y de esta forma poder determinar sus falencias, sus fortalezas, sus limitaciones y establecer cuál de todos permite la mejor documentación de un yacimiento con arte rupestre. Las pruebas sobre el programa inicialmente abarcarán aspectos como su funcionalidad, es decir que cumpla con el objetivo de generar el modelo 3D de un objeto que se encuentre a la mano y posteriormente de un objeto mucho más grande, en este caso se escogió una escultura de una Rana ubicada en una de las paredes del bloque C de la Universidad Pedagógica Nacional.

#### **3.1 Android**

##### **123d Catch®**

123D Catch® es sólo una de la serie de software libre desde el CAD de Autodesk, la versión de la aplicación utilizada es 1.21. Debe tenerse en cuenta que el 16 de diciembre de 2016, Autodesk anunció que todas las aplicaciones 123D, incluyendo Catch, serán descontinuadas en enero de 2017. Esto de hecho ha ocurrido y 123D Catch ya no está disponible para su descarga, pero al ser el primer programa en ser puesto a prueba se tienen resultados completos sobre su funcionamiento y sobre su rendimiento en el campo de acción.

Dentro de los programas de reconstrucción automática se pueden comparar y destacar Autodesk 123D Catch por su ajustado precio, la facilidad de uso y las posibilidades de edición del modelo (Brutto&Meli, 2012). Autodesk 123D Catch también se emplea para la reconstrucción de patrimonio arquitectónico con excelentes resultados (Manferdini&Galassi, 2013). Otros autores demuestran, igualmente, el uso efectivo de este programa para obtener modelos que pueden ser la base para extraer información geométrica precisa (Tsioukas, 2013).

El funcionamiento de Autodesk 123D Catch® se basa en la combinación de fotografías de un objeto previamente seleccionado para la creación de un modelo 3D. Las imágenes deben ser tomadas en diferentes ángulos, en este caso Autodesk 123D Catch® lleva un control de los ángulos de fotografiado e incluye un visor que permite ver el ángulo en que se están tomando las fotos.

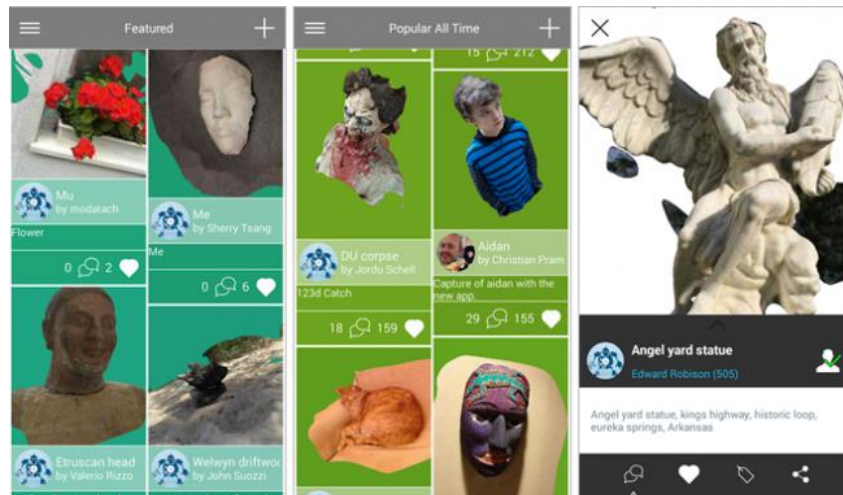


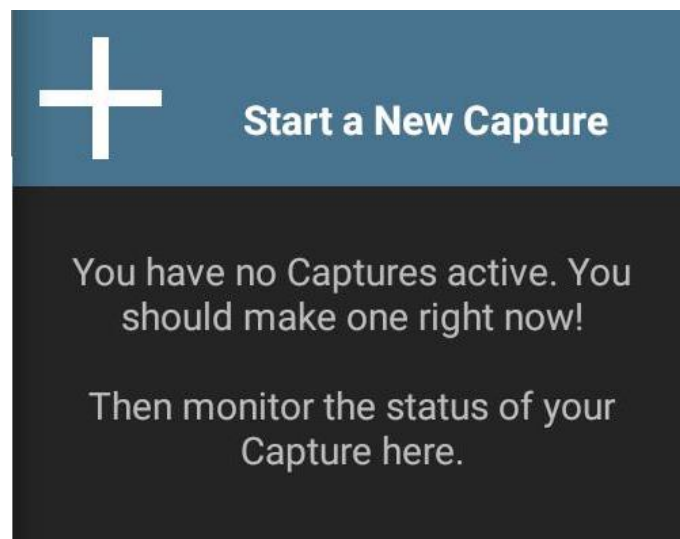
Figura 9. Entorno de la aplicación 123D Catch. Retomado de 123D Catch.

Una vez instalada la aplicación e iniciar sesión, se pueden observar y descargar los diferentes modelos creados por los usuarios. Para iniciar un proyecto propio en Autodesk 123D Catch®, se deben tomar varias fotos escalonadas tanto de la parte superior como de los alrededores del objeto, debe tenerse en cuenta tanto el ángulo, como la distancia, la iluminación. También deben tomarse las fotos sin flash y elegir una ubicación para el objeto en la cual se pueda girar a su alrededor, por medio de ese catálogo de imágenes del objeto, Autodesk 123D Catch® crea el modelo 3D deseado.

La cantidad de fotos determina la calidad del modelo 3D generado, dado que del número total de las mismas estipula cuán detallada y específica será la representación tridimensional del modelo escogido. Posterior al proceso de fotografiado, la creación de los modelos 3D se hace por medio de los servidores de Autodesk, lo cual implica la necesidad una conexión a Internet activa para su procesamiento, al menos cada proyecto pequeño

consume 15 a 110 Mb de ancho de banda para analizar las imágenes, generar la malla y posteriormente crear el modelo 3D. El procesamiento de las imágenes en la nube permite hacer uso de celulares debido a que, comparados con un computador con una tarjeta graficadora su capacidad de procesamiento es mucho menor y por ende el procesamiento debe hacerse en los servidores de Autodesk.

El entorno del programa resulta ser agradable a la vista y sencillo para su manejo, en el panel ubicado a la derecha de la aplicación (Ver Figura 10), se puede agregar un nuevo modelo 3D, para lo cual el programa necesita tomar fotos bien espaciadas y bien estructuradas. Autodesk 123D Catch® proporciona desde el inicio de la aplicación algunos consejos acerca del uso de la cámara y de la forma como se deben tomar las fotografías.



*Figura 10.* Interfaz gráfica de 123D Catch para iniciar una nueva captura. Retomado de 123D Catch

- 123D Catch puede únicamente capturar lo que ve. Imagine una cuerda conectándolo con el centro de su objeto, Camine alrededor de su objeto, tomando fotos solapadas. Tome las fotos de tal forma que cada una ocupe toda la pantalla.
- Tome fotos a diferentes alturas. Camine alrededor del objeto un par de veces. Es recomendable tomar entre 20 a 40 fotos en total.

- Con objetos grandes como construcciones, muévase alrededor de un lado del objeto tomando fotos.

Posterior a esto, el programa pasa a su fase de captura de imágenes, se puede observar como hay un indicador en la esquina inferior izquierda (Ver **Figura 11**), el cual resulta ser una herramienta bastante útil debido a que registra los diferentes ángulos de captura y las alturas a las cuales fueron tomadas las fotografías.

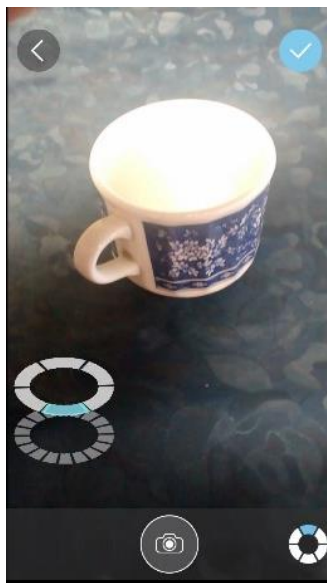
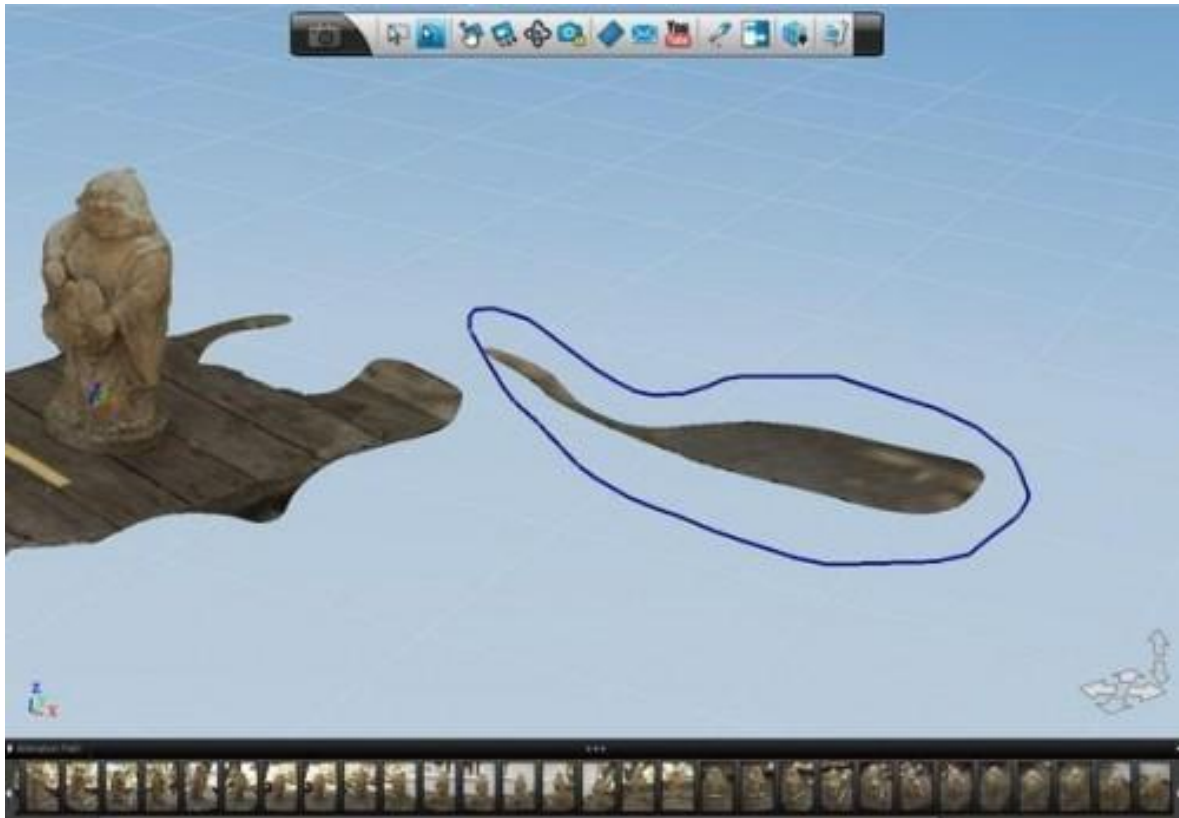


Figura 11. Interfaz gráfica del programa usada para tomar fotografías. Retomado de 123D Catch

Para iniciar se debe hacer clic en “*Escena Compute*”. La primera vez, una ventana emergente le pedirá su nombre y correo electrónico; el boletín es opcional aunque, sus imágenes se cargan a los servicios remotos en la nube. El tiempo estimado para la creación de cada modelo es de 20 minutos a 1 hora. Cuando se haya completado, la escena 3D será construida y abierto en un editor básico 3D.



*Figura 12. .Interfaz gráfica de Autodesk 123D Catch® para editar la malla. (Modelo sin editar).  
Recuperado Autodesk 123D Catch*

En su primer intento, el usuario puede terminar con un modelo 3D más grande de lo que estima, dentro del cual se encuentra el objeto que en primera instancia no es distinguible, para poder tener un modelo 3D manejable y de acuerdo a las características solicitadas por el usuario, es necesario editar el objeto y eliminar las partes que no son necesarias, o en algunas ocasiones es posible que sólo obtendrá un error de procesamiento en los servidores de Autodesk (El cual lastimosamente es muy recurrente). Para evitar esto, hay algunas cosas que el usuario puede hacer:

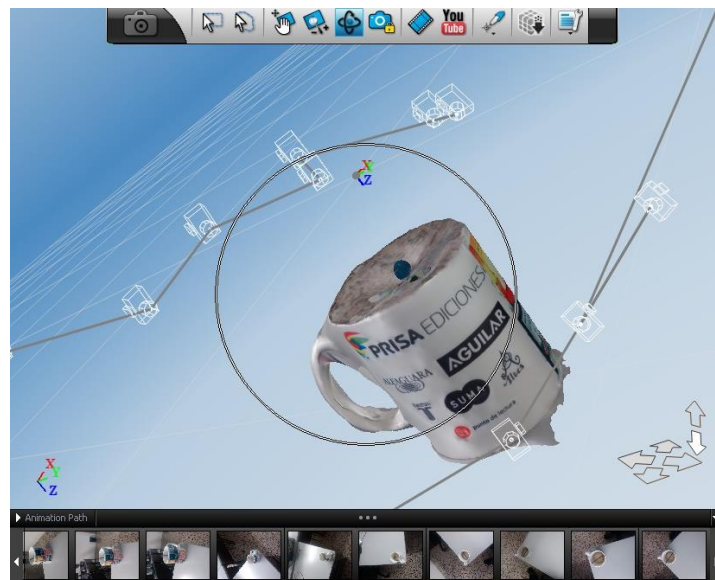
Una de las primeras cosas que se debe aprender es a hacer una exposición fija y encontrar la distancia focal. También debe tenerse en cuenta que la toma de fotografías debe hacerse en algún lugar con luz fija (en un estudio, por ejemplo), o simplemente utilizar el enfoque de bloqueo de la cámara. No debe realizar ningún tipo de edición en las propias fotos (sin cultivo) sólo debe mantener la cámara en una orientación fija, y dar a la aplicación de buena calidad y enfocarse siempre en el objeto deseado.



Para tener un mejor enfoque en las fotos, debe añadir puntos de referencia adicionales (los bordes de una mesa o los de una silla por ejemplo) se debe tener en cuenta que siempre se debe enfocar el objeto en cuestión y en cada foto el objeto debe ocupar un lugar privilegiado, cabe anotar que el objeto debe aparecer completo en todas las fotografías, para que no haya pérdida de información. También se debe tener en cuenta que si todo en la foto parece igual, será imposible determinar desde qué puntos de inicio.

Los objetos transparentes, reflectantes o demasiado brillantes serán capturados. Si está capturando los seres humanos o animales vivos, asegúrese de que no se muevan en lo absoluto, debido a que cada cambio en la postura afecta la definición de la malla resultante.

Autodesk 123D Catch® dispone de su propio editor de mallas 3D online. Después de subir las fotografías, el programa devuelve una malla 3D que puede modificar los modelos con seis sencillas herramientas. Estas sirven principalmente para recortar el entorno del objeto fotografiado y cerrar agujeros que se hayan podido generar.



*Figura 13. Interfaz gráfica de Autodesk 123D Catch para editar la malla generada.  
Recuperado Autodesk 123D Catch*

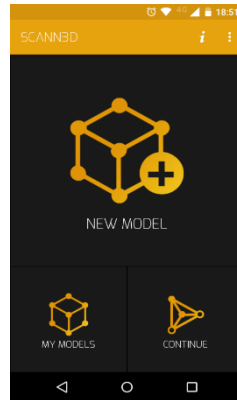
Como puede verse en la **Figura 13**, el modelo 3D creado cumple con algunas de las consideraciones que se exponen con anterioridad en este trabajo, el modelo tiene una resolución que se acerca a la realidad del objeto, igualmente las dimensiones son las adecuadas, aunque la delimitación del modelo no es exacta, hay bordes que necesitan ser eliminados por medio del programa, los colores no tienen la profundidad deseada y hay algunos errores al generar los espacios vacíos, por otro lado la aplicación resulta muy eficaz y sencilla de manejar para el estudiante sin conocimientos en el tema.

Autodesk 123D Catch® resulta ser una buena opción para la generación de modelos 3D de escala pequeña y que estén ubicados en un lugar en el cual haya conectividad con la red de internet, es decir, se pueden tomar las fotografías sin la necesidad de la conexión wifi pero aun así no permite generar el modelo, es por ello que esta aplicación resulta ineficaz para documentar los yacimientos con arte rupestre tanto por su portabilidad como por la calidad de los modelos generados, sin contar además que no se encuentra disponible actualmente.

### **Scann3d®**

SCANN3D® es una aplicación que permite hacer un modelo 3D sencillo, por medio del Sistema Operativo Android. La aplicación utiliza la potencia que tiene cada celular y las fotografías que han sido tomadas desde su cámara, para construir un modelo 3D. Los pasos que se deben seguir el programa serán dados al usuario conforme se avance en la aplicación.

En la pantalla de inicio se pueden observar varias opciones, como cargar los modelos anteriores, continuar con la captura de un modelo anterior o de crear un nuevo modelo (Ver Figura 14)



*Figura 14.* Interfaz Inicial del programa. Retomado de SCANN3D

Scann 3D generalmente recomienda que se gire alrededor del objeto, deteniéndose de vez en cuando y tomando las fotos que sean necesarias. Ahora bien, para lograr mejores resultados se debe garantizar que cada una de las fotos tenga algunos puntos de referencia en común, como se ve en la Figura 15, esto con la intención de permitir la interconexión de las imágenes y facilitar la creación del modelo 3D.



*Figura 15.* Forma como deben tomarse la foto para garantizar mejores resultados. Retomado SCANN3D

La distancia juega un papel primordial, debido a que se deben tomar las fotografías a una distancia prudente, intentando que en cada fotografía salga todo el objeto. Así mismo, se recomienda una iluminación adecuada del objeto, ni mucha ni muy poca, si la iluminación resulta ser menor entonces no serán visibles ante la cámara los detalles y si hay demasiada

iluminación existen problemas con problemas de brillo y de resaltes del color, se debe tener en cuenta que los objetos no estén en movimiento para garantizar una estructura sólida en el modelo generado.

Hay algunos tipos de objetos que pueden presentar problemas al ser escaneados, como por ejemplo objetos que por su naturaleza sean translucidos, como suelen ser los espejos y los vasos de vidrio pueden representar un problema al momento de la reconstrucción del modelo 3D.

En la etapa de la captura la aplicación parece no presentar ningún problema, los errores aparecen cuando se intenta generar un modelo 3D del objeto en cuestión. La tendencia al error del programa es bastante alta de 5 intentos falla 4, la conexión con el servidor genera bastantes errores y muchas veces se pierde el trabajo. En la Figura 16 se muestra uno de los primeros objetos scaneados con la aplicación, de igual manera se observa como el programa no genera un volumen sino que genera una imagen con algunos contornos.



*Figura 16. Uno de los primeros objetos escaneados con la aplicación.  
Retomado SCANN3D*

Teniendo en cuenta esto, se hicieron más pruebas, como por ejemplo se escaneó un busto de Camilo Torres ubicado en el centro de la ciudad.



*Figura 17.* Busto de Camilo Torres.

Los resultados no son los esperados, debido a que no armoniza las fotografías tomadas sino que genera un modelo 3D con muchas distorciones como se puede observar en la Figura 18.



*Figura 18.* Modelo 3D generado del busto de Camilo Torres. Retomado de SCANN3D.

Debido a que los resultados de la creación del modelo 3D del busto de Camilo Torres, se optó por utilizar una característica muy interesante que ofrece Scann3D, la aplicación permite importar las imágenes para crear el modelo 3D, en este caso se intentó generar el modelo 3D de una Rana ubicada en uno de los muros de la Universidad Pedagógica Nacional. Esta importación de imágenes falló, así como también falló la generación del modelo 3D de la rana con fotografías tomadas desde la misma aplicación. La última prueba se hizo en Bojacá, la aplicación permitía, a pesar de no contar con una conexión Wifi, tomar las fotografías de la roca y posteriormente cuando se recuperara la conexión con internet enviar las fotos para su procesamiento. En este caso el resultado fue semejante a los de las ocasiones anteriores, un error al enviar los datos para la construcción del modelo 3D, al igual se intentaron exportar las imágenes tomadas desde otra cámara para generar el modelo de la roca pero la aplicación no soporta tal cantidad de información generando un nuevo fallo en la construcción del modelo.

Por otro lado, una de las características relevantes de SCANN3D es que permite exportar los modelos en formato Obj, Pcd, Ply y Stl, su interfaz de exportación es sencilla, como puede verse en la Figura 19.

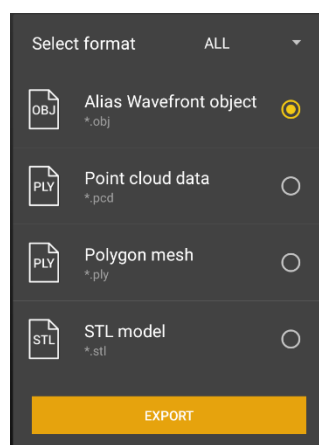


Figura 19. Interfaz de exportación de los modelos 3D generados. Retomado SCANN3D

Scann 3D es una aplicación sencilla de manejar y con varias ideas buenas para implementar en una app para la generación de modelos 3D, pero su larga lista de errores la descarta de plano como una buena opción para la generación de modelos 3D, no solamente de modelos 3D de yacimientos rupestres sino de cualquier otro objeto por más pequeño que sea.

### **3.2 Windows**

Windows es el Sistema Operativo más difundido en el mundo, los programas indizados en esta sección son compatibles con las últimas versiones de Windows, solo en el caso de los programas que utilizan el Kinect como sensor fue necesaria la instalación de programas y drivers adjuntos que permitieron al computador reconocer el dispositivo para su uso posterior.

#### **Photoscan Agisoft®**

Es un software de escritorio el cual está diseñado para procesar imágenes digitales y mediante la combinación de técnicas de fotogrametría digital y algoritmos SMF, generar una reconstrucción 3D del entorno. Existen dos versiones diferentes, la versión estándar está pensada para usuarios casuales que desean generar nubes de puntos a partir de múltiples imágenes y la versión profesional la cual incluye funcionalidades específicas para la generación de productos geomáticos (es decir la ciencia que se ocupa de la gestión de información geográfica mediante la utilización de tecnologías de la información y la comunicación). Esta versión (es decir 1.1.6.2038) le permite obtener orto fotos geo referenciadas de alta resolución y modelos digitales de terrenos de con densidad y detalle excepcionales. En esta versión del programa también es posible generar la textura fotográfica. Es una potente herramienta topográfica y cartográfica. Todo ello utilizando sistemas de referencia cartográficos estándar.

Photo Scan Agisoft® tiene las siguientes funciones:

- Aero-triangulación

- Generación de modelos digitales poligonales (con y sin textura)
- Definición de sistemas de coordenadas geográficas estándar
- Generación de modelos digitales de elevación geo-referenciados
- Generación de orto foto verdadera geo-referenciada

Por sus características, PhotoScan Agisoft® Profesional, es adecuado para la documentación fotogramétrica de edificios, yacimientos y objetos arqueológicos, compitiendo y en ocasiones superando en eficacia y calidad de resultados LIDAR terrestres y aéreos.

Dentro de sus ventajas está la capacidad de simplificar el levantamiento topográfico, permitiendo la medición rápida de entornos complejos cuando dispone de una vista adecuada del entorno a documentar (ej. excavaciones, escarpes rocosos, acopios, yacimientos arqueológicos, escombreras, etc.). El programa también le permite minimizar los tiempo de medición, debido a que no hace falta tomar mediciones sino que el programa las encuentra automáticamente. Así mismo los levantamientos fotogramétricos contienen mucha información potencial, además permite la reconstrucción del objeto en cualquier momento sin necesidad de regresar al mismo lugar, solo con tomar las fotos adecuadamente, esto garantiza la capacidad de generar el modelo en cualquier momento, esta es una gran ventaja frente a otros programas de generación de modelos 3D.

Como resultado de esta flexibilidad del programa el usuario puede obtener su modelo topográfico a partir de imágenes aéreas de dominio público y generar modelos 3D de una gran variedad de objetos.

Es necesario tener en cuenta las especificaciones de la máquina para obtener los resultados deseados, en la mayoría de los casos, el tamaño máximo de proyecto que puede ser procesado está limitado por la cantidad de RAM disponible. Por lo tanto es importante



seleccionar la plataforma que permite instalar cantidad necesaria de memoria RAM. En los primeros pasos del proceso (Nube Densa y Generación de malla) suele tener el mayor consumo de memoria, especialmente si el modelo está construido en la calidad Media o Alta y debe tenerse en cuenta cuidadosamente los requerimientos de máquina para evitar demoras.

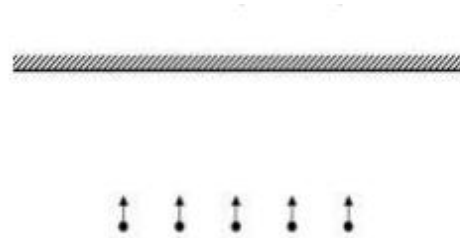
Las figuras mostradas a continuación pueden dar una referencia de como tomar las fotografías en diferentes escenarios.

#### **Fachada:**

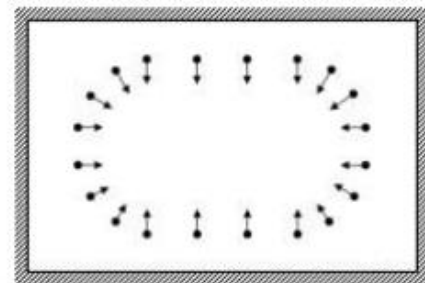
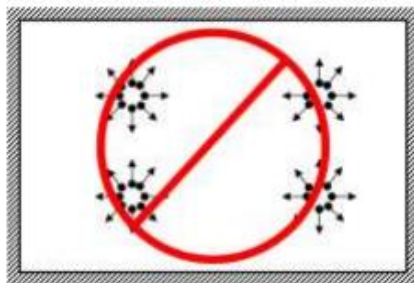
***Incorrecto***



***Correcto***



#### **Interiores:**



## Objetos Aislados:

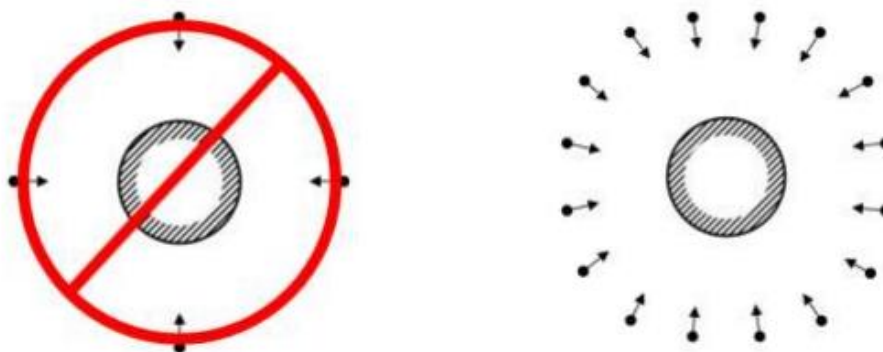


Figura 20. Imágenes recuperadas de [http://www.agisoft.com/pdf/tips\\_and\\_tricks/Image%20Capture%20Tips%20-%20Equipment%20and%20Shooting%20Scenarios.pdf](http://www.agisoft.com/pdf/tips_and_tricks/Image%20Capture%20Tips%20-%20Equipment%20and%20Shooting%20Scenarios.pdf)

PhotoScan Agisoft®, permite procesar muchas más fotos (varios cientos o miles) que otros programas para generación de modelos 3D a partir de fotografías, esta característica le permite una mayor versatilidad de los modelos, ya que el número de fotografías en muchos casos limita el tamaño del modelo generado. El consumo de memoria durante la alineación de las fotografías suele ser más bajo, pero puede ser comparable o incluso exceder la cantidad de memoria necesaria para la construcción de modelos en modo de nube de puntos en baja calidad.

El consumo de memoria y el tiempo requerido para alinear las fotos depende directamente a la cantidad de fotografías que hayan sido cargadas en el programa. En la siguiente tabla se puede apreciar el consumo de memoria medio dependiendo de la cantidad de fotos.

Fotos	100	200	500	1000	2000	5000	10000
Memoria	500 Mb	1 GB	2.5 GB	5 GB	10 GB	25 GB	50 B

**GPU (*Graphics Processor Unit*).**

Agisoft PhotoScan admite la aceleración de la GPU para la coincidencia de imágenes y los pasos de generación de nubes densas, por lo que la tarjeta gráfica compatible con OpenCL o CUDA de gama alta puede acelerar el procesamiento.

### CPU.

Los algoritmos complejos de la reconstrucción de la geometría necesitan muchos de recursos computacionales para procesar. Se recomienda una CPU multi-núcleo de alta velocidad (3GHz +).

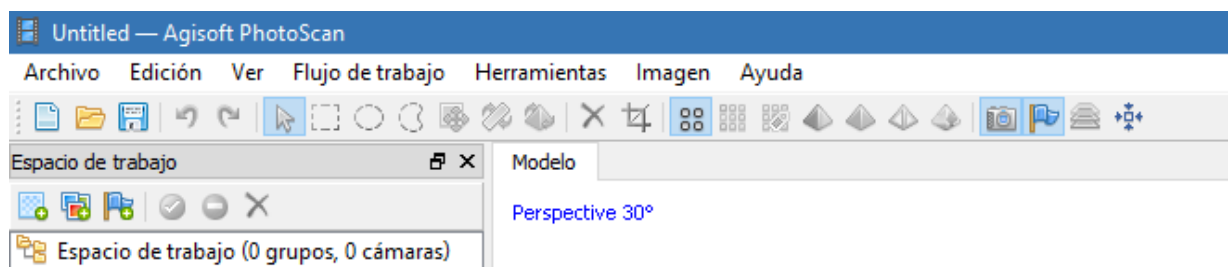


Figura 21. Barra de Herramientas del programa. Retomado de PhotoScan

En la Figura 20 se puede apreciar la barra de herramientas, la cual es muy completa y ofrece una gran cantidad de herramientas para la generación de los modelos. El primer paso para generar un modelo 3D, es cargar las fotos para generar los modelos correspondientes. En la pestaña en la que dice “Flujo de trabajo” se selecciona “Añadir fotos”, En la Figura 21 se puede apreciar cómo quedan cargadas en el programa.

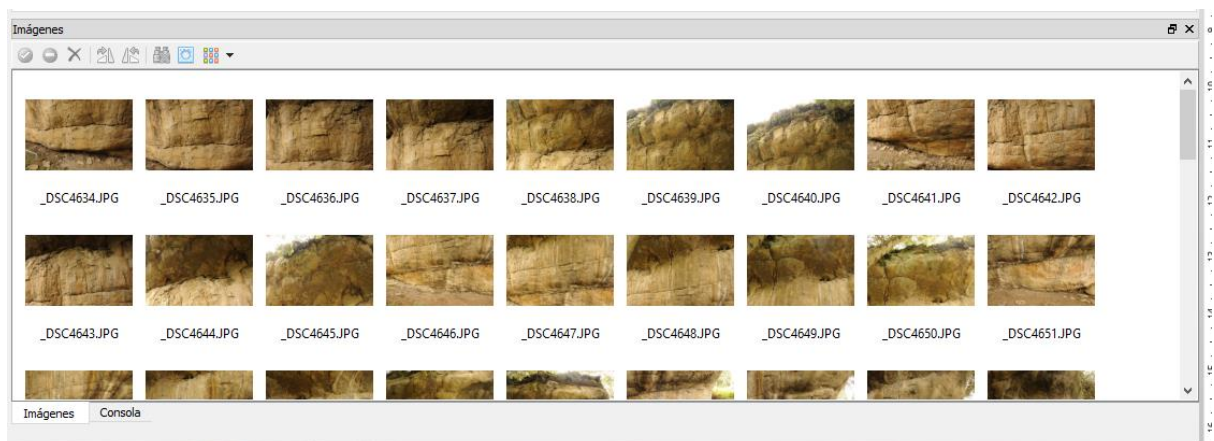
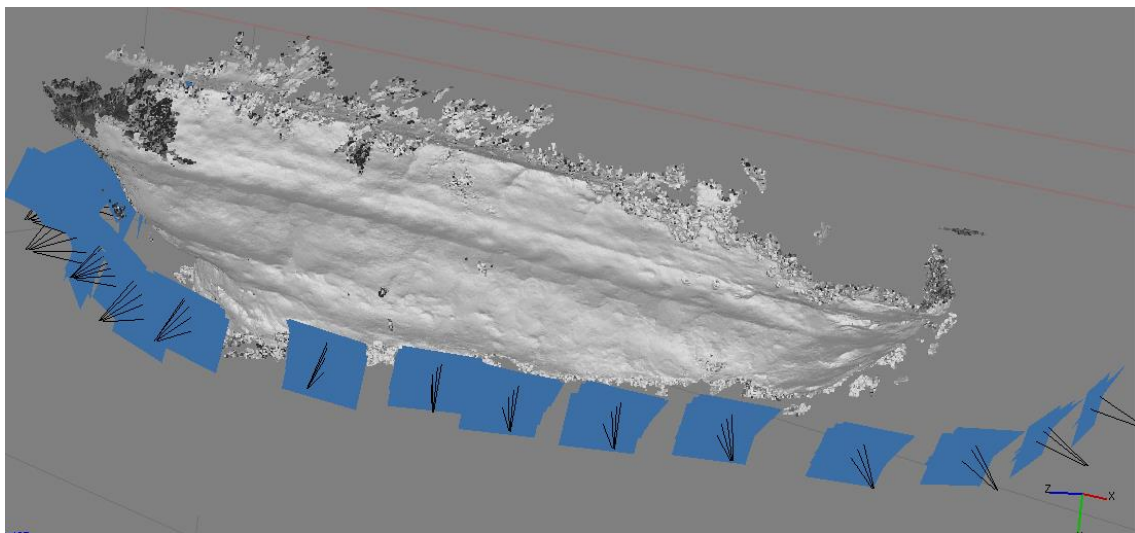


Figura 22. Carga de fotos en el programa. Retomado PhotoScan

Posteriormente se selecciona la opción “Orientar fotos” y se escoge el modo en que se ejecutará tal procedimiento, teniendo en cuenta que entre mayor sea la resolución del objeto más tiempo va a tomar generar el modelo 3D. El resultado del proceso se puede observar en la Figura xxx, en donde se puede ver como el programa calcula las posiciones originales en las cuales fueron tomadas las fotografías, mostrando cada una de estas posiciones con un recuadro azul. Las líneas negras que salen de los cuadros azules indican los diferentes ángulos en los cuales las fotos fueron tomadas.



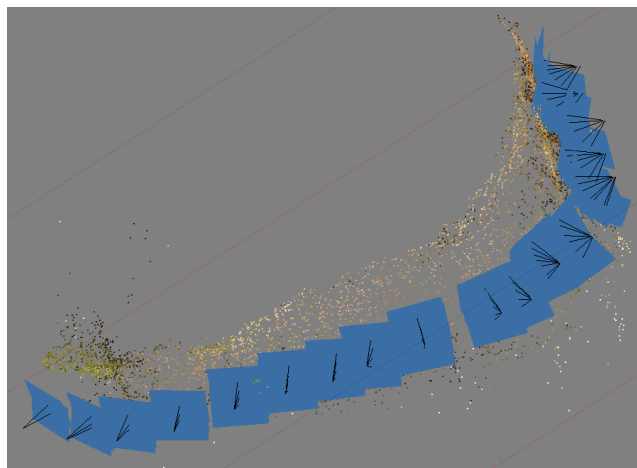
*Figura 23.* Resultado del proceso de Orientar Fotos, los rectángulos azules representan la posición de la cámara en cada una de las fotos que se tomaron. Retomado PhotoScan

Ahora bien, la opción “Crear nube de puntos densa”, permite generar una nube de puntos, la cual a su vez es un conjunto de datos en algún sistema de coordenadas. Generalmente un sistema de coordenadas tridimensional está destinado a representar la superficie de un objeto. En los sistemas de información geográfica, las nubes de puntos son una de las fuentes utilizadas para hacer el modelo digital de elevación del terreno. Así que, basándose en las posiciones de cámara estimadas, el programa calcula la información de profundidad para cada cámara que se va a combinar en una única nube de puntos densos.

En el cuadro de diálogo “Construir nube de puntos densa” se establecen unos parámetros los cuales pueden ser elegidos por el usuario para cambiar ciertos parámetros de la nube de puntos. En la Figura 23 se puede observar el resultado de dicho proceso.

- **Calidad:** Media (una calidad más alta toma bastante tiempo y exige más recursos computacionales, de menor calidad se puede utilizar para el procesamiento rápido)
- **Filtrado de profundidad:** Agresivo (si la geometría de la escena a reconstruir es compleja con numerosos detalles pequeños o superficies sin texturas, como los techos, se recomienda el Modo de filtrado de profundidad suave, para que no se resuelvan las características importantes).

Al generar una nube de puntos densa con una mayor calidad, se notarán en el modelo generado con mayor nitidez las pequeñas diferencias en la roca y muchos detalles en su forma, esto se podrá ver con mayor claridad en el resultado final.



*Figura 24. Nube de puntos densa del yacimiento rocoso. Retomado PhotoScan.*

Posterior a la construcción de la nube de puntos densa, se selecciona la opción “Construir malla” (opcional: se puede omitir si no se requiere un modelo poligonal como resultado final). Después de que se ha reconstruido la nube de puntos densos es posible

generar un modelo de malla poligonal basado en los datos densos de la nube En la opción “Construir malla” se puede encontrar las siguientes opciones:

**Tipo de superficie:** Altura Campo

**Fuente de datos:** Nube de puntos densa

**Número de polígonos:** Medio (número máximo de caras en el modelo resultante) Los valores indicados junto a las etiquetas predefinidas Alto / Medio / Bajo se basan en el número de puntos en la nube densa.

**Interpolación:** habilitada

El último paso es generar la textura de la malla, en este caso el tipo de mapeado de textura determina la forma en la cual la textura del objeto será ensamblada. El modo de mapeo ayuda a obtener la textura óptima y en consecuencia, una mejor calidad visual del modelo final.

El último paso del proceso es “*Generar Textura*” dentro del cual se pueden encontrar las siguientes opciones

**Genérico.**

El modo genérico viene configurado por defecto; este permite parametrizar las texturas, de igual manera el programa intenta crear la textura más uniforme posible.

**Ortofoto adaptativo.**

Cuando está en el modo de asignación adaptativa de ortofotos, el programa tiende a producir una representación textura compacta para más escenas casi planas, manteniendo una buena calidad de la textura de las superficies verticales, tales como paredes de los edificios.

**Ortofoto.**

El método de asignación de ortofotos produce Incluso textura más compacta que el método de representación Ortofoto adaptativo a expensas de la textura de calidad en áreas verticales.

**Esférico.**

Cuando se genera la asignación de texturas en esférico es crucial para definir el cuadro delimitador de manera adecuada.

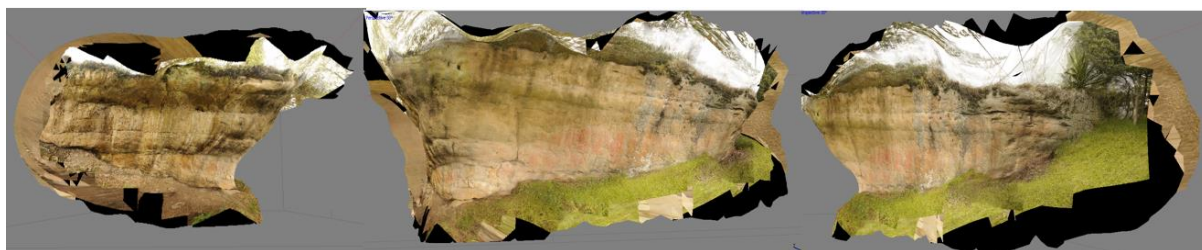
### **Cámara Única.**

El modo de cámara individual permite el mapeo para generar la textura de una sola fotografía. La imagen que se utilizó para la texturización se puede seleccionar de 'textura de' lista.

### **Conservar Mapa UV.**

Mantener el mapeo UV genera textura mediante la parametrización de la textura actual. Se puede utilizar para reconstruir atlas de textura utilizando diferentes resoluciones o para generar el atlas para el modelo parametrizado en el software externo.

Una vez ejecutado este último paso, se podrá obtener el modelo 3D del objeto seleccionado, en este caso en particular el modelo de un yacimiento rocoso (Ver Figura 24) en ella se pueden apreciar diferentes enfoques de la roca, el enfoque frontal permite observar el panel sobre el cual están grabados la mayoría de los pictogramas y los enfoques laterales permiten observar las diferentes características de la roca y su forma real.



*Figura 25. Modelo 3D del yacimiento rocoso. Retomado Agisoft PhotoScan.*

Para fines comparativos y debidos a que varios programas por cuestiones de portabilidad no se pudo generar el modelo 3D del yacimiento rupestre, se adjunta el modelo generado de una escultura una Rana en relieve ubicada sobre uno de los muros del edificio C de la Universidad Pedagógica Nacional (Ver Figura 25)





*Figura 26. Modelo 3D de la rana ubicada en las instalaciones de la Universidad Pedagógica Nacional. Retomado de PhotoScan*

PhotoScan Agisoft®, es sin lugar a dudas la mejor opción para la generación de los modelos 3D y para la documentación del arte rupestre, no solamente por la extensa documentación que existe de su trabajo sino por sus resultados experimentales, es la única aplicación que no necesita de una conexión a internet, debido a que la generación del modelo 3D se hace a través del computador del usuario, no necesita conexión a la corriente eléctrica ya que genera los modelos a partir de fotografías, si bien una desventaja es que no es intuitivo, el proceso de aprendizaje y manejo resulta muy sencillo. Además su tasa de errores es muy pequeña ya que por más carga que tenga el programa (cantidad de fotos), Agisoft Photo Scan falla solo eventualmente, es decir que falla 1 vez máximo de cada 10 intentos. Sumado a todo esto los modelos generados son fieles al original, tanto en tamaño, forma, color, textura. El programa no deja espacios vacíos en el modelo.

### **Autodesk Remake®**

AutoDesk Remake® (antes conocido como AutoDesk Memento) es una de las soluciones para capturar la realidad por medio de fotografías o imágenes escaneadas en mallas 3D de alta resolución, los cuales pueden ser editados, corregidos y optimizados (Por medio de AutoDesk ReCap 360®), para poder ser utilizados en diferentes aplicaciones como la ingeniería inversa, la impresión de modelos 3D, la publicación web y en este caso específico, para recrear un yacimiento arqueológico. AutoDesk Remake® fue diseñado



pensando en los usuarios que no disponen de experiencia en modelado 3D, por lo que su interfaz es bastante amigable y la documentación sobre el mismo es bastante extensa.

Las ventajas de AutoDesk Remake® en proyectos de visualización, prototipado, archivo histórico o arqueológico, impresión 3D o ingeniería son evidentes, debido a la sencillez de su interfaz, la cual facilita la construcción detallada de los modelos 3D, al reducir y simplificar todo el proceso de captura, edición, optimización de mallas y su exportación final para ser compartida vía web o para su impresión 3D física se hace de manera rápida y eficaz. Es decir el proceso de creación de los modelos 3D es intuitivo y no necesita de la intervención del usuario final en el mismo, esta es una opción excelente para aquellos que están iniciando en el mundo de los modelos 3D, pero para quienes tienen experiencia en la creación de dichos modelos resulta incómodo debido a que no permite configurar la calidad ni la texturización de los modelos, características primordiales y que influyen ostentosamente en el resultado final.

Se puede descargar una versión de prueba por treinta días directamente internet<sup>17</sup>, la versión utilizada es la 17.25.3.1. Una vez instalado el programa en el inicio se encuentra un tutorial corto para aprender el manejo adecuado para el mouse. Al iniciar, el programa indica los requerimientos mínimos en Hardware para generar los modelos desde la computadora y de esta manera que no se utilicen los servidores de Autodesk.

El proceso de creación del modelo 3D se hace desde los servidores de AutoDesk, ahora se escogen las fotos para hacer el modelo 3D correspondiente, en la Figura xxx se puede observar resaltado en rojo como el programa únicamente permite un máximo de 50 fotos por proyecto, lo cual limita enormemente el tamaño de los modelos generados, en el caso de un yacimiento rupestre como el encontrado en Bojacá, esta cantidad de fotos resulta

---

<sup>17</sup> <https://remake.autodesk.com/try-remake>

completamente insuficiente para documentar toda la extensión del mural y cubrir la extensión de la roca, sus particularidades y sus diferentes rasgos.

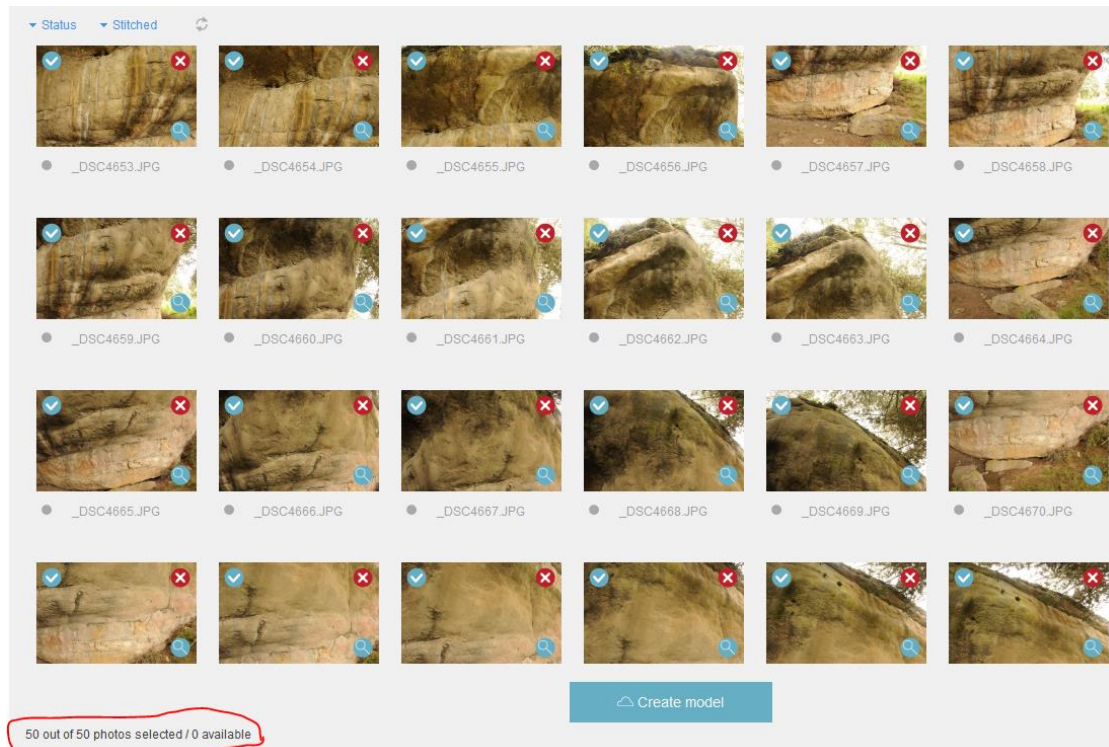


Figura 27. Carga de fotos en el programa y su límite. Retomado de AutoDesk Remake

El programa solicita escoger las opciones de creación del modelo, dentro de las cuales se encuentran el nombre del modelo, la calidad, la textura y si se desea el corte automático de ciertas estructuras que no aportan información valiosa al modelo a generar. En la Figura 27 se evidencia el resultado del modelado de la roca, este procedimiento tomó alrededor de 34 minutos, lamentablemente por el número de fotos que puede procesar el programa el tamaño del objeto y de los contornos no es comparable con el de otros programas (PhotoScan) de igual manera puede verse los resultados de la generación del modelo de la Rana (Ver Figura 28) ubicada en las instalaciones de la Universidad Pedagógica Nacional, la cual se agrega con fines comparativos.



*Figura 28. Modelo 3D del yacimiento rocoso. Retomado de AutoDesk Remake*



*Figura 29. Modelo 3D de la rana. Retomado de AutoDesk Remake*

Como puede verse, los resultados son similares a los de otros programas de generación de modelos 3D, en cuanto a objetos pequeños los resultados no varían mucho, pero en este caso se necesita el programa para realizar la documentación de un yacimiento rocoso y la cantidad de fotos (como se mencionó con anterioridad) limita la capacidad del programa.

AutoDesk Remake® posee varias herramientas para la edición del modelo, entre ellas se encuentran opciones de cortado, opciones de relleno de agujeros esta opción generalmente se utiliza para darle al objeto 3D una apariencia más compacta, re triangulación

de la selección de una parte del objeto, esto se utiliza para cuando se tiene la certeza de que alguna de las partes del modelo quedó mal generada y esta opción permite al usuario retriangular esta parte para obtener mejores resultados. De igual manera ofrece una vista en rayos x del objeto, lo cual es una herramienta muy útil para el usuario ya que por medio de esta es posible detectar los cambios en la morfología del objeto (Ver Figura 29), y de esta manera poder detectar posibles fallos e incongruencias en el modelo generado.

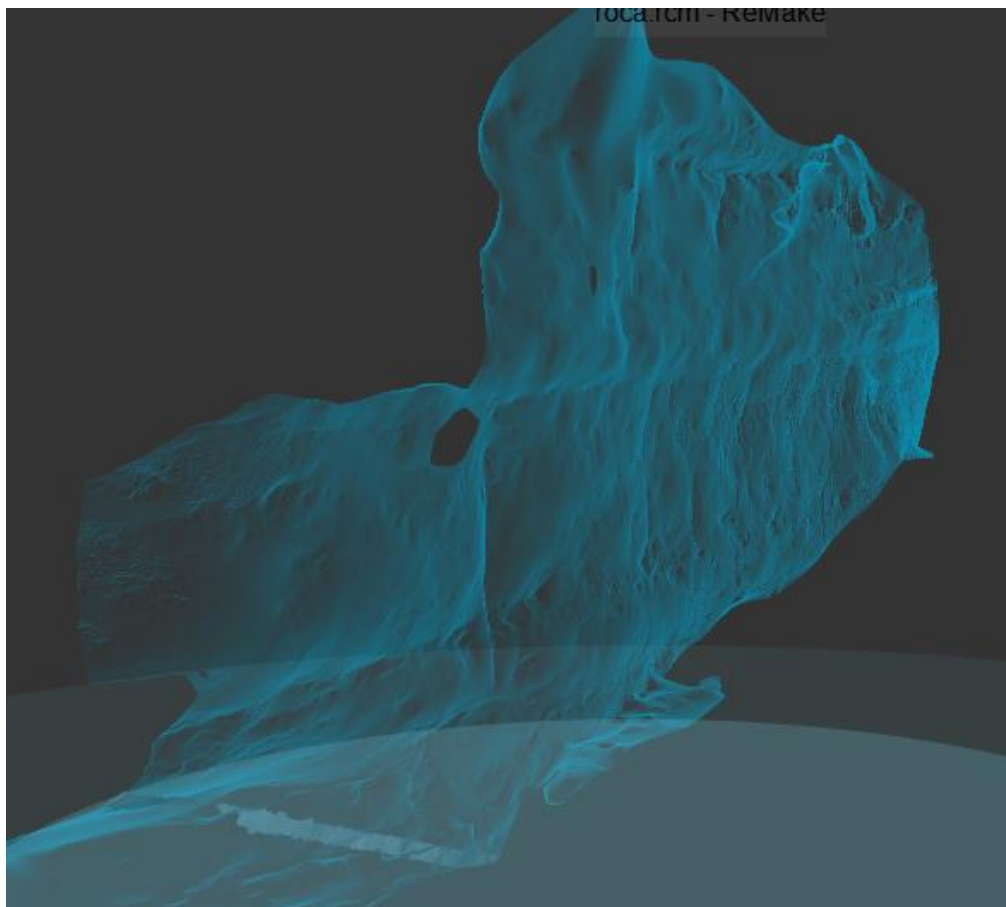


Figura 30. Herramienta de Rayos X. Retomado de AutoDesk Remake

En la parte inferior del programa se puede cambiar el tipo de selección, en ella hay una herramienta llamada lazo, la cual elimina los errores encontrados en el modelo, pero al no tener como rellenar la parte de la malla eliminada el objeto queda incompleto. También puede hacerse uso de la herramienta “*slice and fill*” puede eliminarse partes innecesarias del

modelo, la herramienta funciona como una hoja de sierra que corta la base del objeto, o también activando la opción “*Transform Plane*” se puede cambiar la inclinación de la hoja.

AutoDesk Remake® permite exportar modelos de manera rápida o con algunas opciones avanzadas, dentro de la exportación rápida se encuentra que el programa exporta los modelos en formato obj, fbx (formato utilizado en 3ds Max), en un formato fbx (optimizado para editar con AutoCAD) y en otros tipos de formato especiales para ser utilizados por Maya y por MeshMixer, la exportación puede hacerse de baja, de media o de alta calidad.

AutoDesk Remake® es una buena opción para la documentación de objetos 3D que se encuentren en un ambiente con conexión a internet y para trabajar con objetos no tan grandes, como una escultura, los resultados como se dijo con anterioridad son de una calidad excelente pero su limitada capacidad en la cantidad de fotografías que se pueden cargar y su dependencia al internet hacen que no sea una opción viable.

### **3d Som.**

3d Som Pro es una solución profesional para el modelado 3D automatizado de objetos del mundo real. Es una potente herramienta de software para crear contenido 3D de calidad profesional a partir de fotografías. Se puede modelar una amplia gama de objetos, incluyendo aquellos con agujeros y formas orgánicas "difíciles". Este programa ha sido creado por Creative Dimension Software, 3DSOM Pro convierte un conjunto de fotografías de origen de un objeto en geometría 3D texturizada.

El programa incluye funciones para corregir la distorsión de la lente y enmascarar el fondo de un disparo, junto con las herramientas semi-automáticas y manuales para optimizar los mapas de geometría y textura que genera. Igualmente el programa se utiliza principalmente en el diseño y la investigación, pero es capaz de una amplia gama de resultados, incluyendo la captura de personas. El principal cambio en 3DSOM Pro 5 es la

opción de reconstruir objetos a partir de fotografías capturadas contra cualquier fondo: antes, se necesitaba disparar contra una plancha de calibración. El proceso de fotografiado es el mismo que se utilizó con los anteriores programas, las fotografías deben ser seriadas, teniendo puntos en común para facilitar la reconstrucción del modelo, de igual manera debe tenerse en cuenta la iluminación del objeto a escanear y evitar ante todo los movimientos bruscos.

Además, la carga de imágenes JPEG es muy rápida debido a que es un multiproceso, por lo que el rendimiento debe ser mejorado no importa lo que el flujo de trabajo de captura y hacer de la GPU que utiliza. Usando una cámara convencional, las fotos de su objeto se toman siguiendo una secuencia ordenada y garantizando que estén bien enfocadas. La forma del objeto se extrae automáticamente de cada foto y esta información se utiliza para construir una malla 3D de alta calidad en formato obj que se utilizará en cualquier aplicación 3D.

La versión de prueba puede descargarse de la página<sup>18</sup> y luego de diligenciar un breve cuestionario, la descarga estará lista. En la Figura 30 se puede apreciar como el programa después de instalado le da la bienvenida usuario.

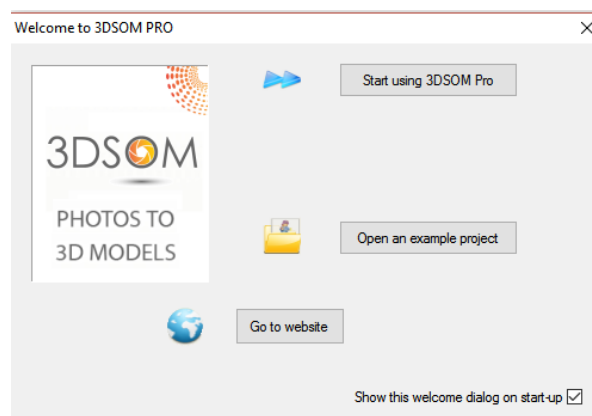


Figura 31. Interfaz de inicio 3DSOM PRO. Retomado 3DSOM

---

<sup>18</sup> <http://www.3dsom.com>



En la pantalla principal se encuentran las diversas herramientas para generar el modelo 3D, lo primero que debe hacerse es ir a “*Images*” y posteriormente escoger la opción que dice “*Add Images*”, una vez cargadas las imágenes comienza a cargar las posiciones de las cámaras.

Una de las características más interesantes de 3DSOM es que luego del proceso por medio del cual calcula la posición de las cámaras, detecta y elimina automáticamente las fotos que el programa determina que no aportan información relevante al modelo en un principio parecía una herramienta muy útil y bastante ingeniosa, infortunadamente con la experiencia se ha evidenciado que esta opción deja por fuera una gran cantidad de fotos (Ver Figura xxx) y que son útiles para generar un modelo 3D.

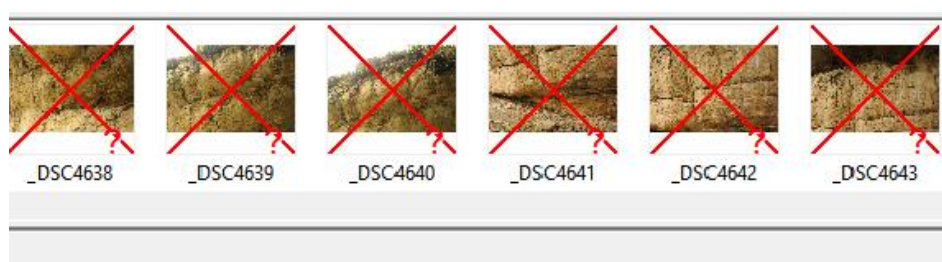


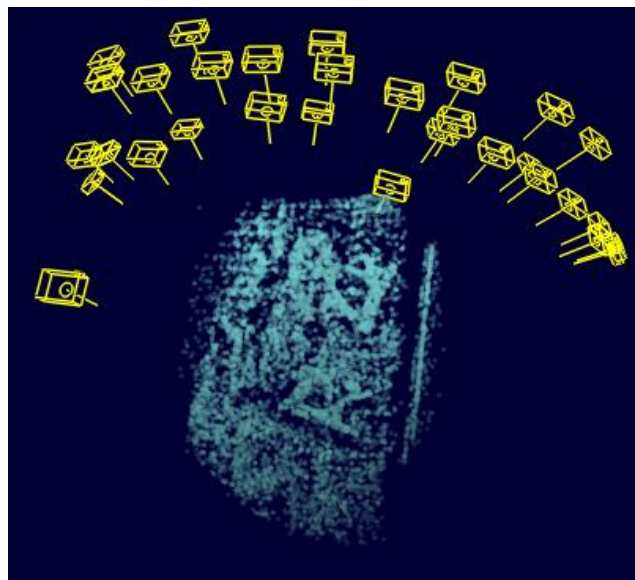
Figura 32. Imágenes eliminadas automáticamente. Retomado de 3D SOM

Posterior a este paso, en “*Processing*” se encontrarán las opciones necesarias para crear el modelo 3D a partir de las fotografías previamente cargadas. Se inicia con la creación de la máscara, en ella se permite la generación del modelo sin fondo o con fondo, igualmente se advierte que “Aumente el valor de umbral para incluir más de la imagen en las máscaras, o reduzca para incluir menos. Utilice la nariz de color para ignorar las sombras en el telón de fondo”.

Este asistente generará y optimizará la geometría que forma la parte externa del modelo 3D utilizando las siluetas del objeto por medio de las imágenes enmascaradas.

Cuando el número de imágenes eliminadas por el programa es tan grande, debido a que no cumple con sus requisitos, se hace normal que el programa presente dificultades a la hora de generar la nube de puntos densa.

Luego de más de 15 minutos de espera, los resultados del procesamiento de las imágenes y de la creación de la nube de puntos densa pueden verse en la Figura xxx, en ella se pueden vislumbrar levemente el relieve de una rana. Posterior a la creación de la nube de puntos, se intenta crear la malla a la cual se le podrá agregar una textura para así completar el modelo.

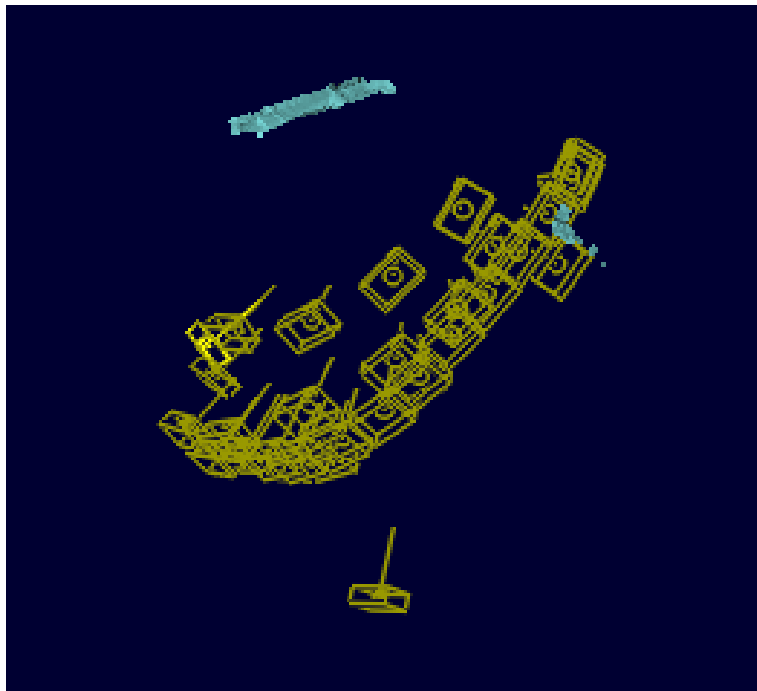


*Figura 33. Nube de puntos densa y posición de la cámara. Retomado 3D SOM*

Y es precisamente generando la malla y la textura en donde 3DSOM presenta problemas, debido a que en primer lugar el proceso inhabilita completamente el uso del computador (situación que únicamente se presenta con este programa) paralizando la pantalla e impidiendo el uso del mouse, el cambio a otra aplicación y cualquier otra operación con el computador. El bloqueo del computador en esta fase es tanto que al no obtener respuesta el usuario promedio procede a apagar por métodos no habituales el computador.



Paradójicamente y luego de varias horas de espera los resultados no son los esperados (Ver Figura xxx), no solamente no genera una malla sino que no genera ningún resultado visible, al principio se creyó que era un problema con las fotos y se intentaron crear diferentes modelos de diferentes objetos pero con todos arroja este grave problema. En la figura anterior se puede visibilizar por lo menos el contorno de la rana, en este caso no es así, tan solo arroja el resultado que puede observarse en la Figura 33.



*Figura 34.* Resultado final de la construcción del modelo 3D. Retomado 3D SOM

3D Som se perfilaba como un rival fuerte de PhotoScan, debido a que tienen una interfaz muy parecida y un funcionamiento similar, pero sus resultados en el campo de acción (como se vio a lo largo de esta reseña) no son los esperados e infortunadamente no se pudieron obtener modelos 3D utilizando esta herramienta. Esto sumado al gran consumo en RAM de la aplicación, lo convierten en una opción no viable al momento de realizar la documentación de un yacimiento arqueológico.

## **Autodesk 360 Recap®**

Autodesk 360 Recap® o la Nube de Autodesk es un espacio virtual donde almacenar archivos, editarlos, mostrarlos, comentarlos, dejar anotaciones y recuperarlos. Dada la conexión, cada vez más fluida, entre distintos terminales y dispositivos. Autodesk 360 Recap® posee una gran ventaja frente a otros programas de modelado 3D y es que se puede acceder a la Nube desde cualquier dispositivo y cargar los modelos 3D generados con esta herramienta, sea móvil o de escritorio: Smartphones, tabletas, portátiles, etc.

La generación de los modelos se hace online, por lo que está supeditada a la conexión a Internet, obviamente se hace referencia directa a una serie de servicios que Autodesk 360 ofrece a todos los niveles: profesional, particular y/o estudiantes. Destacando la versatilidad de las herramientas y servicios incluidos, adaptables a cualquier necesidad.

Ahora bien, existen algunas particularidades que hacen de Autodesk 360 una herramienta indispensable para trabajar. Autodesk 360, conlleva otras aplicaciones anidadas en ella. Como por ejemplo, la herramienta Recap Photo o Pixir, que permiten generar o modificar un archivo 3D, o retocar imágenes respectivamente para, por ejemplo, luego poder visualizarlo desde un dispositivo móvil y mostrarlo a un cliente.

Autodesk 360 ofrece una serie de herramientas para trabajar desde un computador de escritorio o portátil, también ofrece herramientas o aplicaciones específicas para dispositivos móviles que permitan seguir utilizando Autodesk 360 si el usuario no está en su puesto habitual de trabajo.

Es necesario destacar algunas de estas aplicaciones para móviles que conectan con la Autodesk 360 como Autodesk Buzzsaw Mobile, que permite acceder a archivos y documentos compartidos por un grupo de trabajo, Autodesk Inventor Publisher Mobile Viewer, que ofrece la visualización de forma interactiva de instrucciones de ensamblaje,

o AutoCAD WS, para poder abrir o editar un archivo de CAD, cabe mencionar que todas estas *apps* están disponibles tanto para Android como iOS.

En la página de inicio<sup>19</sup> se visualizarán los proyectos que el usuario haya cargado y aquellos que no se pueden visualizar (Ver Figura 35). Para generar un nuevo modelo 3D se hace clic en “*Photo to 3D*”.

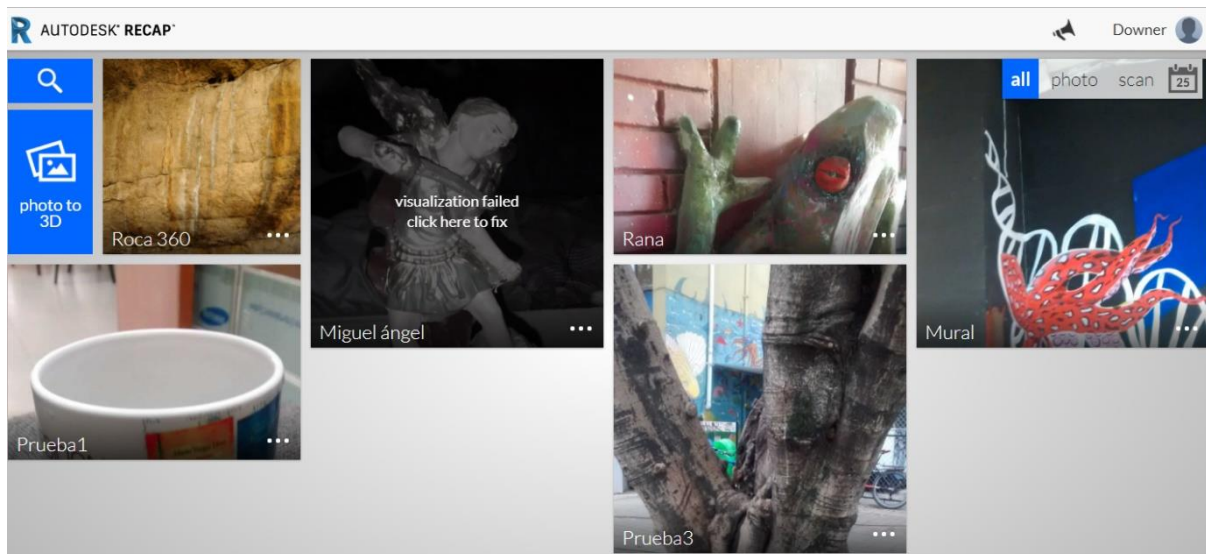


Figura 35 Pantalla de inicio, se pueden ver los diferentes modelos 3D generados por la aplicación.  
Retomado AutoDesk 360 Recap

Al clicar en “*Photo to 3D*” aparece una pantalla en la cual se podrán agregar las fotografías y generar los modelos 3D, debe recordarse que no deben ser fotografías en alta resolución (.nef) sino fotografías en formato JPEG, las fotografías no deben ser más de 50 debido a que el programa tan solo procesa esa cantidad de fotografías, esta característica limita el tamaño del objeto creado al igual que con AutoDesk Remake.

Posterior al proceso de agregar las fotos, se nombra el objeto y se escogen las opciones de generación de los modelos 3D, entre ellas están Recorte inteligente (*Smart cropping*) el cual recorta gráficos innecesarios detrás de las posiciones de la cámara, Optimización del

<sup>19</sup> <https://recap360.autodesk.com/>

nadir desactivada (*nadir optimization*) por medio del cual se puede incluir una optimización avanzada añadiendo una referencia geográfica (datos EXIF GPS) para mayor precisión, de igual manera se escoge el formato de salida del modelo 3D ya sea en obj o en rcm, generalmente se activa el Recorte inteligente y si se tienen datos de la ubicación geográfica de las fotografías se activa la configuración Nadir. (Ver Figura),

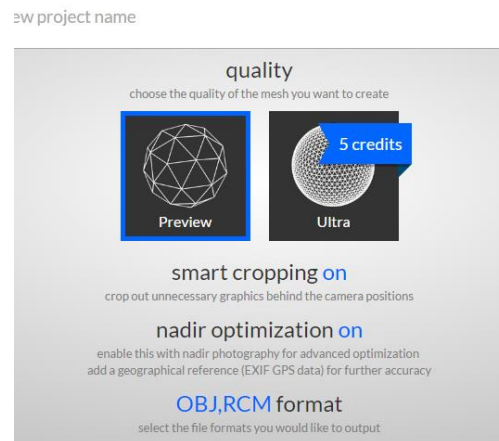
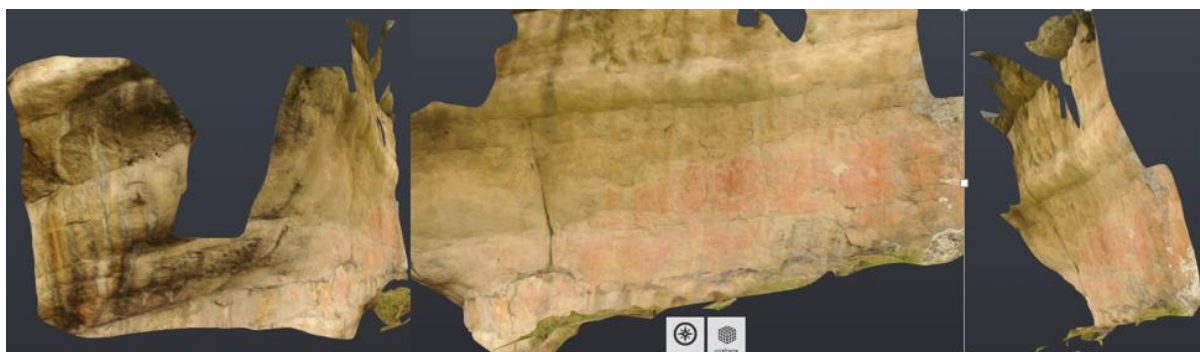


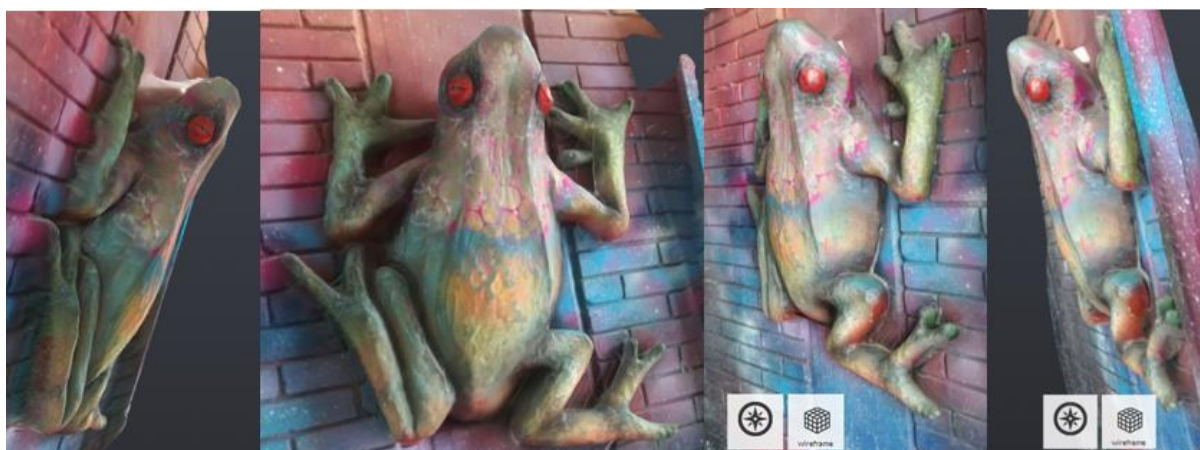
Figura 36. Configuraciones iniciales del modelo a crear. Retomado AutoDesk 360 Recap

El modelo es creado por medio de los servidores de AutoDesk, este proceso tiene una duración de unos 20 a 40 minutos dependiendo de la cantidad de fotografías. Los resultados pueden apreciarse en la Figura 36, en ella se evidencia como el límite de la cantidad de fotografías incide completamente en el resultado, debido a que para el yacimiento rocoso de Bojacá se tomaron alrededor de 120 fotos, los resultados en cuanto a fidelidad son muy buenos lamentablemente no abarca toda la extensión de la roca sino tan solo una parte.



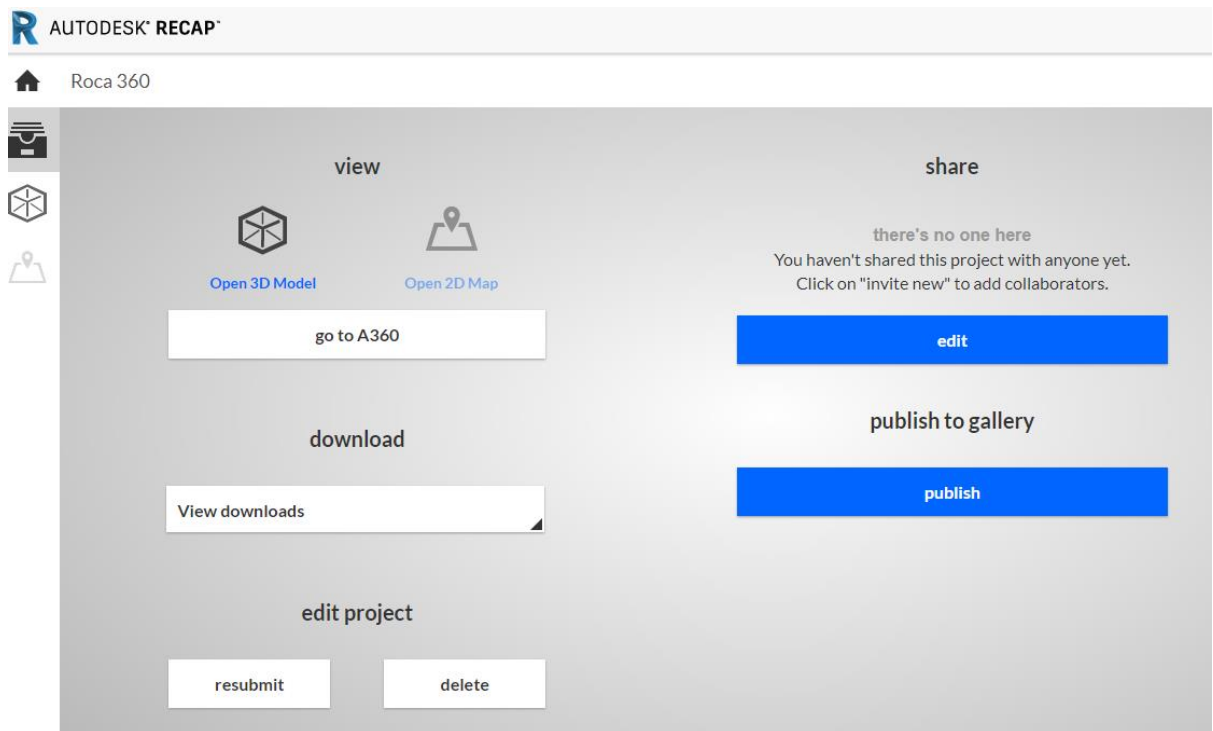
*Figura 37. Modelo 3D del yacimiento arqueológico. Retomado AutoDesk 360 Recap*

De igual manera se agrega el modelo de la Rana de la Universidad (Ver figura 37) para comparar sus resultados junto con aquellas aplicaciones que por motivos de portabilidad no pudieron generar el modelo 3D del yacimiento rocoso.



*Figura 38 Modelo 3D de la Rana ubicada en la Universidad Pedagógica Nacional. Retomado AutoDesk 360 Recap*

La nube de AutoDesk permite muchas funciones con cada uno de los modelos generados por medio de la página (Ver figura 38), entre ellas se encuentran compartir el modelo, editarlo, publicarlo en una galería, abrir el modelo o descargarlo. La sencillez y la facilidad para crear el modelo 3D hacen de este programa una excelente opción al momento de generar los modelos 3D.



*Figura 39. Diferentes herramientas que ofrece AutoDesk 360 Recap para editar o descargar los modelos.  
Retomado AutoDesk 360 Recap*

AutoDesk 360 Recap es una buena opción para la documentación de objetos 3D, pero su capacidad se ve limitada a la ciudad ya que depende de una conexión Wifi para generar el modelo y aun así también tiene la limitante del número de fotografías que se pueden cargar lo que lo hace inviable para la documentación de yacimientos rupestres, debido a que las rocas por lo general tienen varios metros de altura y necesitan de más de 100 fotos para documentarlas, los modelos generados son de una calidad excelente si se mejorara esta característica sería una alternativa muy llamativa.

### 3.3 Kinect

Para iniciar con la instalación de todas las aplicaciones desarrolladas para Kinect, debe instalar antes Kinect para Windows SDK v1.8, Versión 1.8.0.595 el cual permite a los desarrolladores crear aplicaciones que soportan el reconocimiento de gestos y de voz, utilizando tecnología de sensores Kinect en equipos que ejecutan Windows 7, Windows 8, Windows 8.1 y Windows 10.

El Kinect para Windows SDK, el controlador y el tiempo de ejecución v1.8 son 100% compatibles con Kinect para Windows v1.0, 1.5, 1.6, 1.7 y aplicaciones.

El Kinect para Windows SDK incluye lo siguiente:

- Los controladores para el uso de sensores de Kinect para Windows en un equipo que ejecuta Windows 7, Windows 8, Windows 8.1 y Windows Embedded Standard 7
- Interfaces de programación de aplicaciones (API) y las interfaces de dispositivos

Las muestras, herramientas y otros recursos valiosos de desarrollo están disponibles en el Kinect para Windows Developer Toolkit. Una vez instaladas estos controladores se verifica que la configuración del Kinect sea la correcta y se procede con la instalación de los programas.

Kinect es un controlador de juego desarrollado por Microsoft para la videoconsola Xbox 360 y para PC a través de Windows 7 y Windows 8. Kinect permite a los usuarios controlar e interactuar con la consola sin necesidad de tener contacto físico con un control de videojuegos tradicional, mediante una interfaz reconoce gestos, comandos de voz y objetos e imágenes.

En este apartado encontrará un pequeño tutorial de cómo utilizar el sensor Kinect para llevar a cabo el escaneo de los objetos el cual permitirá generar los modelos 3D. Este dispositivo es capaz de percibir imágenes 1080p HD, imágenes infrarrojas, profundidad de los elementos de la imagen, origen del sonido, todo esto y más gracias a la gran cantidad de sensores de los que dispone. Estos sensores son:

- Cámara RGB: resolución de 1920x1080 capaz de tomar 30 o 15 fps (fotogramas por segundo) dependiendo del nivel de luz.
- Emisores IR (infrarrojos): resolución de 512x424 capaz de tomar valores de intensidad de 16 bits a 30 fps.
- Sensor de profundidad: capaz de calcular, gracias a los emisores IR, las distancias (en milímetros) respecto al sensor con valores de 16 bits en un rango de 0.5 a 8 metros.
- Array de micrófonos.



*Figura 40.* Sensor utilizado para realizar la construcción de los Modelos 3D. Imagen retomada de <http://www.arkadian.vg/uso-de-kinect-para-manipular-tu-pc-con-gestos/>

Ahora bien, en el proceso de escaneo se debe tener en cuenta los siguientes consejos:

- Las condiciones lumínicas deben ser las adecuadas



- Sutileza en los movimientos del sensor, o en el movimiento del objeto según se haga el escaneo, para evitar las pérdidas de información.
- Los objetos deben ser objeto fácil del escaneo, debido a que si no hay partes en las cuales no se tiene alcance estas partes no entrarán en el modelo final.

### **Skanect.**

Skanect es desarrollado por la compañía ManCTL, una entidad francesa-americana fundada a finales de 2011 por Nicolas Tisserand y Nicolas Burrus. La empresa fue adquirida por Occipital en 2013. El objetivo del programa es permitir tomar una cámara Microsoft Kinect o Asus Xtion (un sensor de Asus que permite realizar aplicaciones y juegos sensibles al movimiento) y convertirlas en un dispositivo de escaneo 3D.

Con Skanect, el usuario promedio puede capturar a todo color los modelos 3D de casi cualquier cosa, desde habitaciones a personas o incluso objetos en menos de 30 segundos. Skanect tomará una cámara Microsoft Kinect y la transformará en un escáner 3D que eliminará la necesidad de hardware costoso. Una de sus ventajas es el precio. Para uso personal o aficionado hay una versión gratuita y para uso comercial es sólo € 99. La versión gratuita viene con algunas limitaciones como las exportaciones directas de Skanect sólo es posible a **Sculpteo** o **Sketchfab**. Además, sólo puede exportar hasta 5000 caras a la vez. El uso del sensor de estructura con Skanect hace que sea muy fácil para casi cualquier persona capturar, refinar y compartir escaneos en 3D de calidad de personas y objetos.

Lo primero que debe hacerse es descargar e instalar Skanect en su PC Mac o Windows desde la página<sup>20</sup> y posteriormente abrir el programa, en el cual encontrará con una imagen de inicio (Ver figura 39), el modelo de escaneo por medio de Skanect está basado en cinco pasos, los cuales se pueden ver en la parte superior de la pantalla de inicio, estos cinco pasos son “*Prepare*”, “*Record*”, “*Reconstruct*”, “*Process*” y “*Share*”, en primer lugar Prepare permite al usuario escoger la configuración inicial y adicional del proceso de escaneo, Record hace referencia al procedimiento de grabación, Reconstruct permite fusionar todas las caras generadas en una sola malla, Process es la parte del proceso en la cual se pueden cambiar algunas características del modelo como rellenar los espacios vacíos, mover y cortar partes del modelo, quitar los colores y demás, en la parte superior derecha encontrará un panel de verificación que posibilita conocer el estado del Sensor de Kinect y de la capacidad de la GPU de su computadora (Ver figura 40), al encontrarse el ícono en color amarillo significará que el dispositivo no se encuentra listo, si se encuentra en verde significa que el dispositivo se encuentra listo, pero si por el contrario el ícono se encuentra en rojo significa que o no se



Figura 41 Pantalla de inicio Skanect. Retomado de Skanect

tienen los drivers instalados para utilizar el Kinect o que la GPU del computador no es la apropiada para el trabajo.

<sup>20</sup> <http://skanect.occipital.com/download/>

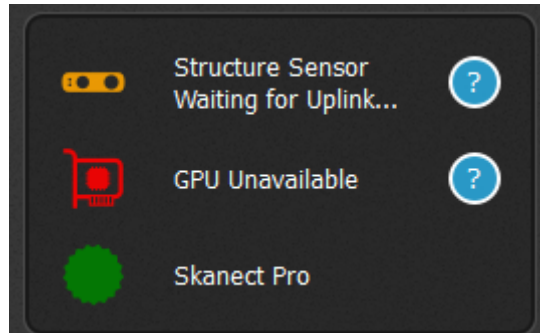


Figura 42. Detalle de la viñeta de verificación de los requisitos mínimos para iniciar el escaneo. Retomado Skanect

En esta pantalla de inicio se encontrarán una variedad de opciones, dentro de las cuales se encuentran “*Nuevo*” el cual permite llevar a cabo un nuevo escaneo, “*Load*” el cual permite cargar un escaneo hecho con anterioridad, en “*Seetings*” se encontrará la configuración adicional la cual permite asegurarse que los resultados sean óptimos y acorde a las necesidades del usuario, en él se pueden editar la calidad del escaneo, si baja, media o alta, archivos de configuración adicionales y la profundidad del color (Ver figura 41).

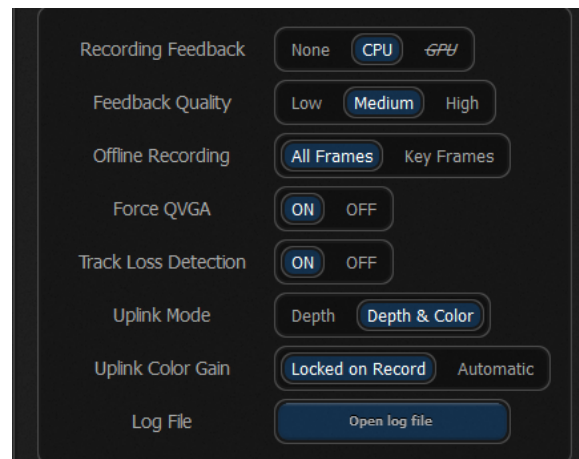


Figura 43 Configuraciones adicionales del programa. Retomado Skanect

Una vez seleccionada la configuración del programa, en “*Nuevo*” se inicia el escaneo de un nuevo objeto, por lo tanto debe asegurarse de que los ajustes estén acorde al objeto a escanear, es decir debe seleccionar si va a escanear un objeto, un cuerpo, un cuarto un muro,

el aspecto en el cual se presentará el modelo y si tiene algún tipo de archivo de configuración debe cargarlo (Ver imagen 42).

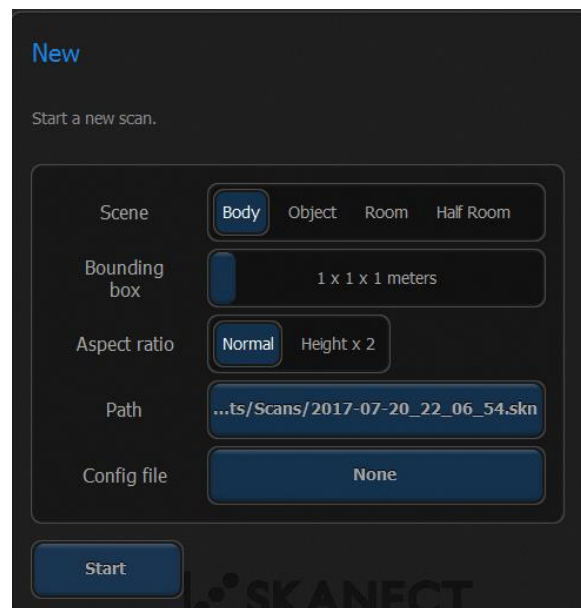


Figura 44 Configuración inicial para un nuevo modelo. Retomado de Skanect

Al iniciar un proyecto nuevo, el “Delay” determina el tiempo que cuenta el programa antes de iniciar a escanear el objeto y el botón rojo indica cuando se inicia y cuando se detiene el escaneo. En la figura 43 se puede observar el proceso de escaneo, las partes que están en color verde indica las partes que están siendo escaneadas y las que aparecen en color rojo son las que el sensor no detecta, se debe mover el Kinect alrededor de todo el objeto para así obtener una imagen completa. La pantalla de grabación tiene diferentes ventanas en las cuales se puede observar los límites del escaneo y de las partes que están siendo captadas por el sensor.

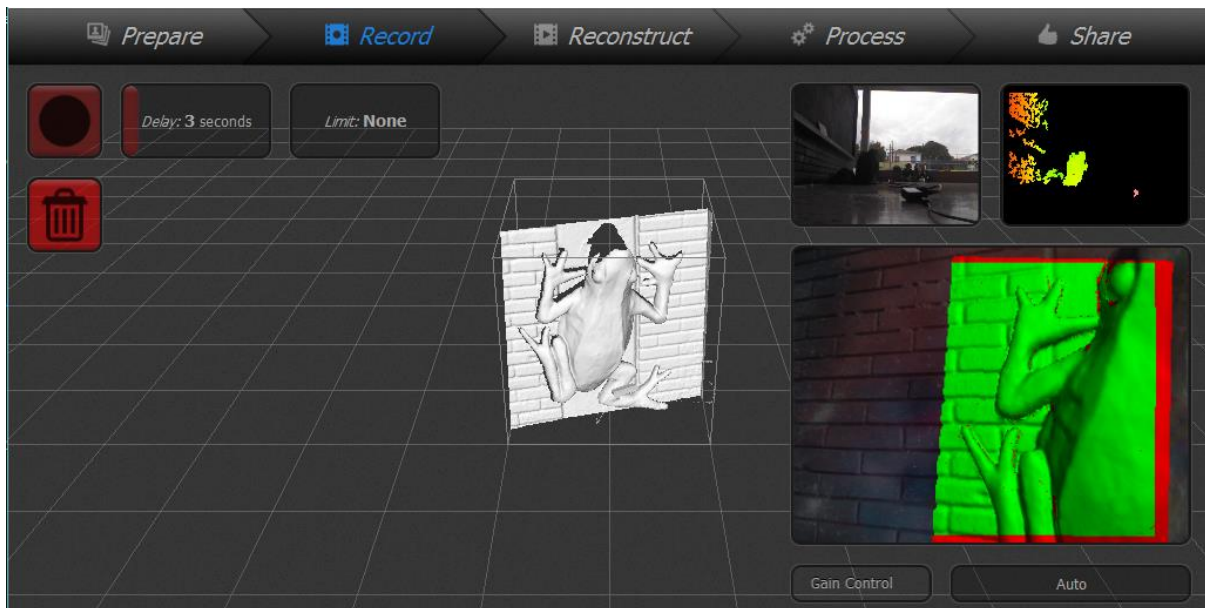


Figura 45. Proceso de escaneo de la Rana de la Universidad. Retomado de Skanect

Ahora bien, en “*Reconstruct*” se encontrarán las opciones para convertir las caras del objeto escaneado en una malla mucho manejable para el usuario, en ella se puede definir que parte del computador hará la reconstrucción, si la CPU o la GPU(*Graphics Processor Unit*). El resultado de este proceso se puede observar en la Figura 44 en ella se puede apreciar tanto el modelo generado como el recorrido del sensor alrededor del objeto.

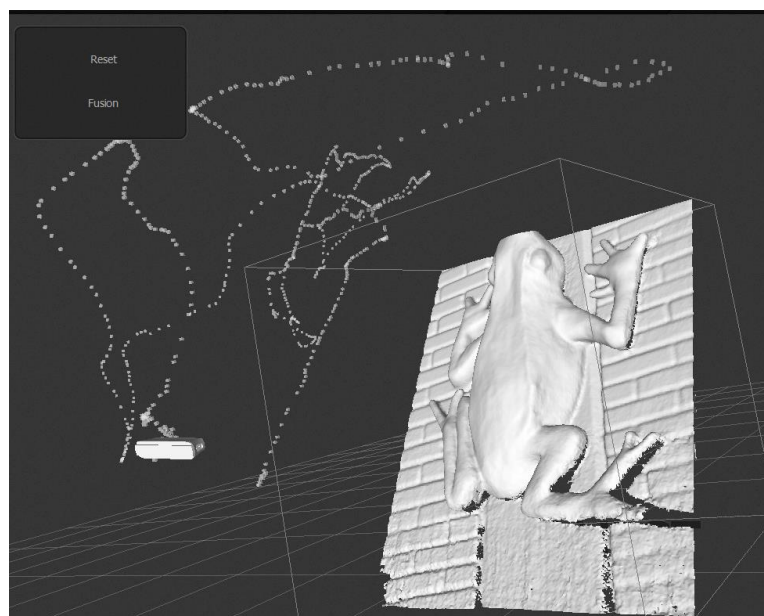


Figura 46 Modelo 3D generado sin colores e identificación del movimiento del sensor alrededor del mismo. Proceso de escaneo de la Rana de la Universidad. Retomado de Skanect

Una vez el usuario se encuentra en “*Process*”, el cuál es la cuarta fase del proceso de modelado 3D, en esta fase se encontrarán diferentes herramientas como *Waterlight*, *External Edit*, *Simplify*, *Fill Holes*, *Move & Crop*, *Colorize*, *Remove Colors*, *Inpaint Colorless* y *Remove Colorless*.

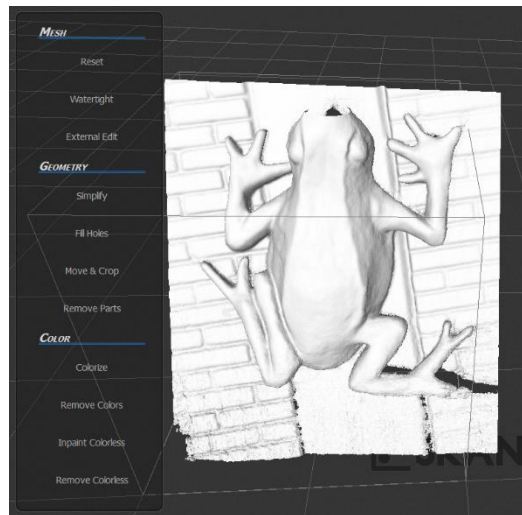


Figura 47 Procesado del modelo y sus diferentes herramientas. Proceso de escaneo de la Rana de la Universidad. Retomado de Skanect

*Waterlight*, permite crear una malla de color de agua, *Simplify* (*Simplificar*) reduce el número de caras para hacer el modelo más manejable, *Fill Holes* (*Rellenar orificios*) compone los orificios y repara las superficies, en ella encontrará los límites en los cuales se especifica el rango máximo de extrapolación, *Mover y recortar* (*Remove and Crop*) como su nombre lo dice remueve partes del objeto escaneado que no resultan útiles. Las otras opciones facilitan el manejo de las opciones de color del modelo 3D. El resultado como puede verse en la Figura 46 es un modelo de una calidad excelente, aunque los colores exceden un poco a los reales, sin embargo las dimensiones y la morfología del objeto son exactas al original.



Figura 48. Modelo Final. Proceso de escaneo de la Rana de la Universidad. Retomado de Skanect

El programa permite guardar el objeto, generalmente se guardan en los documentos del computador en la carpeta Scans. En “Share”, la última etapa del proceso, se podrá compartir el modelo 3D generado y exportarlo, en las opciones de exportación se encuentra una gran variedad de formatos para exportar el modelo, se puede exportar el objeto a un formato ply, obj, stl y vrlm (es importante exportarlo en esta forma debido a que conforma tanto la forma como el color), de igual manera se puede configurar la escala (metros, milímetros o pulgadas), así como también varias opciones de color.

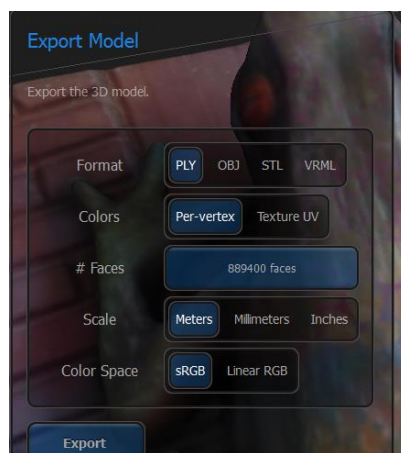


Figura 49 Opciones de importación del modelo 3D. Retomado de Skanect

En el programa los modelos generados son fieles al original, tanto en tamaño, forma, color, textura y no deja espacios vacíos en el modelo. Skanect es una opción sería para el modelado de objetos 3D, lamentablemente la portabilidad, es decir la necesidad de una conexión a la corriente eléctrica y la imposibilidad de llevar el sensor a todos los rincones de la roca hacen de este programa una opción viable pero no útil para la documentación de yacimientos rupestres.

### **ReconstructMe.**

Esta herramienta es desarrollada por un grupo de expertos en visión por ordenador de PROFACTOR, una empresa de investigación en producción situada cerca de Steyr - Austria, especializada en robótica y visión por ordenador. Las versiones 2.1, 2.0 y 1.2 son las más descargadas por los usuarios del programa. Esta herramienta para PC se diseñó para ejecutarse en Windows 7, Windows 8 o Windows 10.

ReconstructMe es un poderoso sistema de escaneo en tiempo real en 3D que le brinda un concepto similar al de una cámara de vídeo común: simplemente mueva el objeto a modelar en 3D. El programa se escala a partir de objetos más pequeños como caras humanas hasta salas enteras y se ejecuta en el hardware de la computadora.

El controlador instalado para los dispositivos de escaneo debe estar instalado, como por ejemplo Kinect de Microsoft y Asus Xtion. Después de instalar los controladores para los dispositivos de escaneo el usuario debe comprobar la disponibilidad de los sensores en el administrador de dispositivos.



El programa está disponible en la página<sup>21</sup>, una vez descargado e instalado, la pantalla de inicio lucirá así (Ver figura 48) y en ella se encontrarán varias opciones como *Volume*, *Handling*, *Surface* y *Device*.

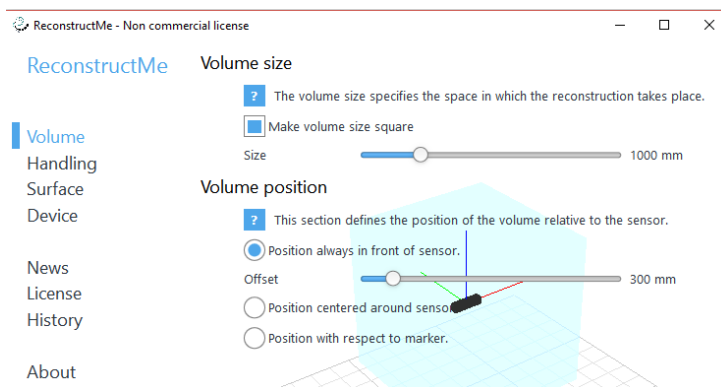


Figura 50 Pantalla de inicio ReconstructMe.  
Retomado de ReconstructMe

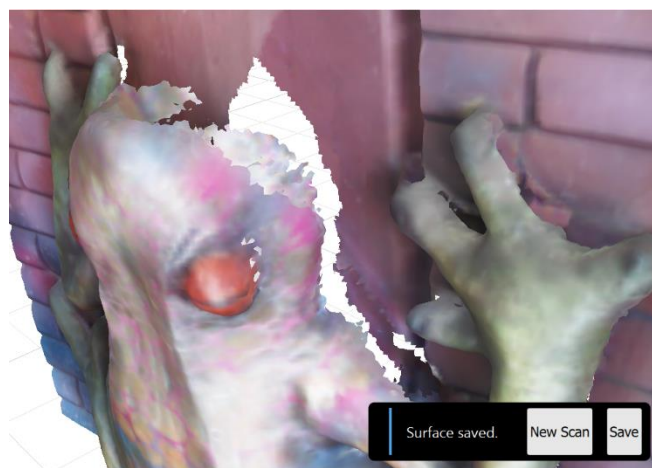
En *Volumen* se pueden encontrar las configuraciones para editar el tamaño de la figura a escanear, el tamaño máximo permitido es de 4000 mm es decir 4 metros, esto se convierte en un limitante para el trabajo que se desea llevar a cabo, debido a que las dimensiones de la roca a escanear son mucho mayores a estas medidas. En “*Handling*” se puede ajustar el retardo después del cual debe comenzar la reconstrucción, así como la duración del escaneo. En “*Surface*” se configura si se desea dar color al modelo generado. Así mismo en el aparte “*Device*” se puede escoger el nivel de calidad en la reconstrucción, también se escoge el dispositivo utilizado para escanear el objeto. Los resultados se pueden ver en la Figura 49 y en ellos se evidencia que ReconstructMe permite generar los modelos 3D, pero los contornos no se encuentran bien delimitados y los bordes de las figuras no se encuentran suavizados.

<sup>21</sup> <http://reconstructme.net/>



*Figura 51. Modelo 3D de la rana generado por medio de ReconstructMe.  
Retomado de ReconstructMe*

Como puede observarse en las Figura 50, hay partes que no quedan bien delimitadas y que al momento de hacer la exportación estos bordes que no se encuentran bien delimitados generan problemas.



*Figura 52. Bordes sin delimitar en la reconstrucción del modelo 3D. Retomado de ReconstructMe*

Se debe tener en cuenta que uno de los principales problemas con el escaneado “manual” es el hecho de que el conjunto de movimientos de exploración tolerados no coincide con su secuencia natural de movimientos. Esto significa que a menudo se ve obligado a moverse más lento de lo previsto, además de tener que asegurarse de que el escáner apunta en las áreas de interés y mantiene una cierta distancia al objeto que se está escaneando. La violación de cualquiera de estas restricciones conduce a escenarios de "seguimiento perdido" y datos dañados, este error sucede con mucha frecuencia. Por otra parte, esta limitación hace que la documentación de un yacimiento con arte rupestre no sea posible con esta herramienta.

Una de sus características más llamativas es la compatibilidad con muchos de los sensores, lo que lo hace más flexible para diferentes usuarios con diferentes dispositivos de escaneado. ReconstructMe es compatible con los sensores RGBD desarrollados por los diferentes fabricantes como la familia ASUS Xtion, la familia Microsoft Kinect, la familia PrimeSense Carmine. Algunos otros dispositivos compatibles son el RealSense R200 de Intel y el RealSense F200, el Astra S de Orbbec y el Astra L, el Asus Xtion Pro de Asus y el Asus Xtion Pro en vivo y muchos otros dispositivos.

Toda la reconstrucción por el programa se realiza en el espacio métrico. Los resultados de ReconstructMe se pueden exportar fácilmente a los diferentes programas CAD con diferentes formatos como PLY, OBJ, STL, 3DS.

Ahora bien, en el programa los modelos generados son fieles al original, tanto en tamaño, forma, color, textura, aunque el programa deja espacios vacíos en el modelo y los bordes generalmente están mal terminados, es decir no suaviza los bordes del modelo, esto determina negativamente en la forma del objeto, sumado a esto la portabilidad, es decir la capacidad de llevar el sensor y utilizar el programa en los lugares donde hay yacimientos

arqueológicos sumado a la necesidad de una conexión a la corriente eléctrica y la imposibilidad de llevar el sensor a todos los rincones de la roca hacen de este programa una opción inviable para la documentación de yacimientos rupestres.

### **Kscan3d.**

KScan3D es una solución en software para escaneo 3D basada en la tecnología del Kinect, el cual proporciona a los consumidores la oportunidad de hacer escaneos de calidad en 3D de objetos del mundo real a un precio accesible. KScan3D es desarrollado por LMI Technologies, un desarrollador de tecnologías de escaneo 3D, medición y visualización de datos. Desde su lanzamiento en Siggraph 2012, KScan3D se ha convertido rápidamente en una de las mejores soluciones de escaneo 3D de bajo costo disponibles. En los últimos años se han añadido algunas nuevas características, incluyendo:

- **Procesamiento de malla más rápido** que también se aprovecha de varios núcleos de CPU.
- **Mejora de los flujos de trabajo de escaneado** con métodos adicionales de captura y procesamiento de datos, mejoras en la interfaz de usuario y mucho más.
- **Mejor calidad de textura** para las mallas finalizadas.
- **Soporte de formato de archivo** mejorado, incluida la exportación .FBX.
- **Soporte adicional de sensores** para dispositivos ASUS Xtion PRO y PRO LIVE.
- **Compatibilidad con Windows 8** para el nuevo sistema operativo de Microsoft.
- **Implementación de OpenNI 2.0 Framework** para mejorar la funcionalidad y mejorar la compatibilidad con otros programas basados en sensores 3D.

Con los sensores KScan3D y Kinect o Xtion, puede escanear, editar, procesar y exportar datos rápida y fácilmente para usarlos con su programa de modelado 3D favorito. KScan3D convierte los datos de color y profundidad capturados por sensores en mallas 3D. Al capturar datos desde múltiples ángulos, puede crear una malla completa de 360 grados. Una vez que haya capturado los datos que necesita, KScan3D permite eliminar puntos innecesarios, diezmar mallas, suavizar datos y mucho más. Así mismo el programa puede exportar las mallas finales en formatos .fbx, .obj, .stl, .ply y .asc para su uso con efectos visuales, desarrollo de juegos, impresión 3D, visualización en línea y muchas otras aplicaciones.

Los beneficios de KScan3D son resultado de años de investigación y de desarrollo en la línea profesional de productos de escaneado en 3D, incluyendo el escáner y el programa de generación de modelos 3D. El programa combina la tecnología con el hardware Kinect de Microsoft, resultando en un éxito al proporcionar a los principiantes, estudiantes, educadores y aficionados, brindar una solución fácil de usar para el escaneo de objetos en 3D.

Con KScan3D, el hardware de Kinect, y la plataforma PC o Mac, los usuarios pueden capturar objetos en 3D rápidamente. Los avanzados algoritmos procesan rápidamente la información capturada y permiten a los usuarios exportar los datos finalizados en una variedad de formatos de archivo comunes. KScan3D está disponible hoy para su descarga en su página principal<sup>22</sup> en la cual se puede comprar por separado o como un paquete integrado con el hardware Kinect basado en Windows. Además de estar disponible una versión de prueba de 30 días de KScan3D.

Una vez instalado el programa se encontrará con la siguiente imagen de inicio (Ver Figura 51) en la cual se encontrarán todas las herramientas necesarias para construir el modelo 3D.

---

<sup>22</sup> <http://www.kscan3d.com/>

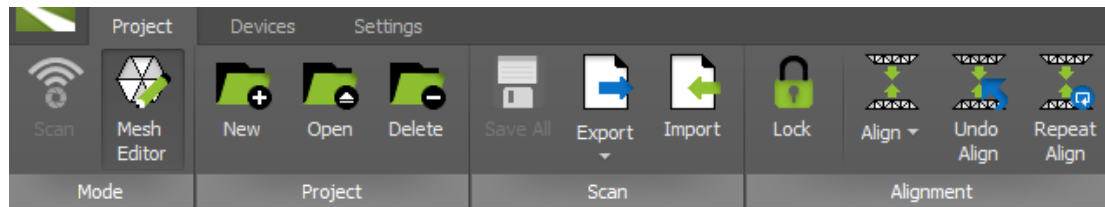


Figura 53. Herramientas iniciales de KScan3D. Retomado de KScan3D

KScan3D permite capturar y alinear automáticamente las mallas 3D. Una vez que haya capturado los datos que se necesitan, puede usar KScan3D para eliminar puntos innecesarios, datos suaves y más. KScan3D también le permite combinar y finalizar mallas con una serie de configuraciones personalizables para ayudarle a obtener los resultados que necesita.

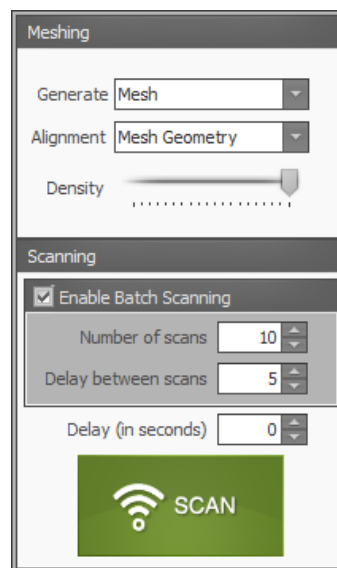
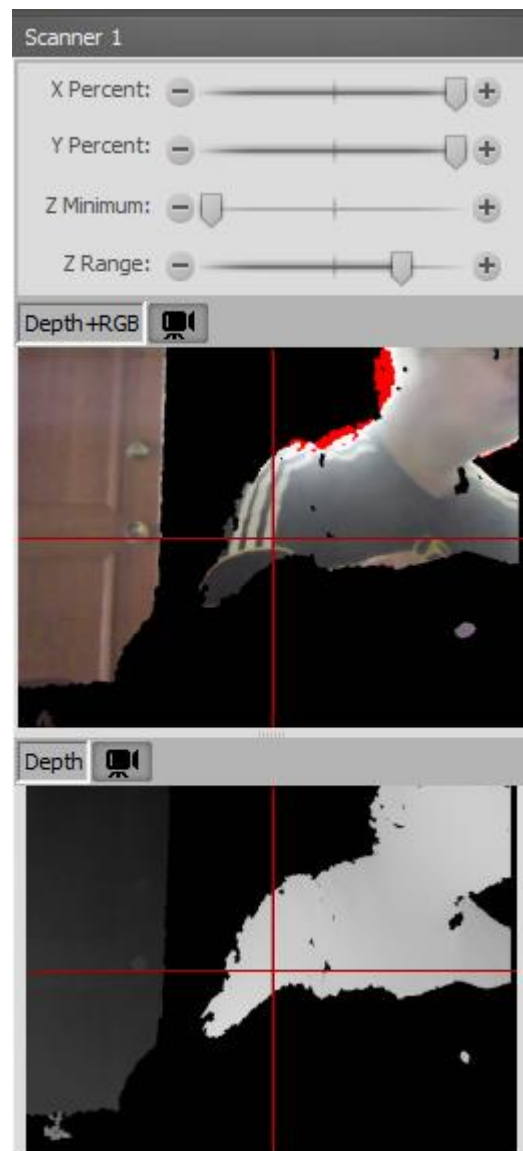


Figura 54. Herramientas para la generación de las mallas. Retomado de KScan3D

Como se puede observar en la Figura 52 existen varias opciones para la generación de las mallas, entre ellas se encuentran la densidad, el número de escaneos (es decir la cantidad de “impresiones” que toma el programa), el tiempo entre los diferentes escaneos y el tiempo de inicio del mismo. En *Generate* se encuentran diferentes opciones, dentro de ellas se encuentran *Capture Only* la cual genera una malla por una sola captura, al igual se encuentra

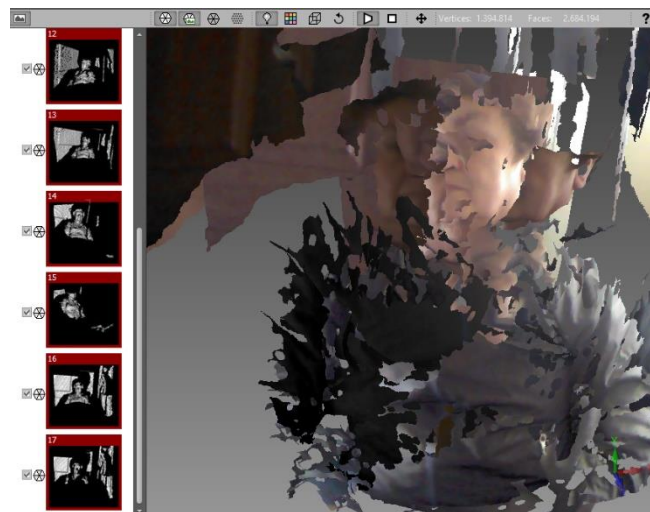
la opción denominada Número de escaneos y el Delay los cuales permiten configurar la cantidad de tomas que hará el sensor y el tiempo entre cada una de ellas.

En la Figura 53 se puede observar que existen dos barras en la parte superior, las cuales permiten configurar las partes que se desean eliminar del escaneo cambiando los valores porcentuales en X o en Y.



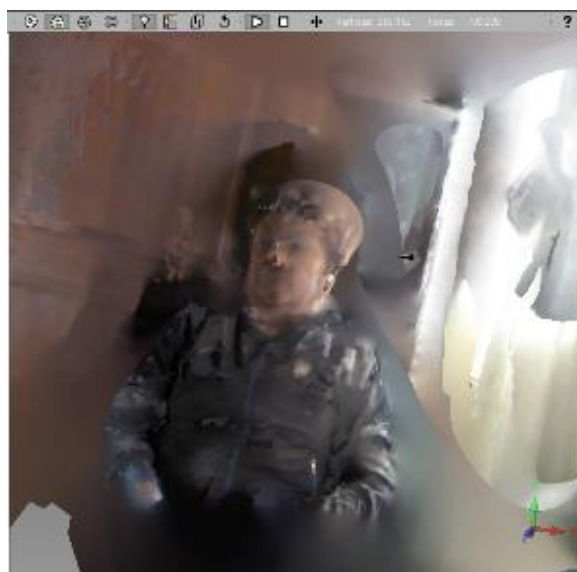
*Figura 55.* Pantalla de escaneo. Retomado de KScan3D

De igual manera, se debe tener en cuenta la distancia adecuada a la cual realizar el escaneo ya que presenta enormes problemas para poder detectar el objeto, en la Figura 53 se puede ver como lo que es objeto del escaneo queda en color gris y lo que no queda en color negro. La herramienta “alinear” permite poner en el mismo plano todos los escaneos llevados a cabo, como se muestra en la Figura 54 el programa toma muchas instantáneas que después deben ser alineadas correctamente para permitir la generación del modelo 3D.



*Figura 56* Instantáneas tomadas del objeto a escanear. Retomado de KScan3D

Ahora se lleva a cabo la alineación de las capturas para que genere un modelo más compacto, los resultados saltan a la vista



*Figura 57* Modelo 3D generado a partir de las capturas. Retomado de KScan3D



El programa posee una gran ventaja: permite en la misma escena ubicar varios escaneos y trabajar individualmente en cada uno de ellos, esto ningún otro programa lo tiene, es una herramienta que puede servir en la creación de entornos virtuales, en las cuales existe la necesidad de manejar varios modelos 3D. Hay que aclarar además que el programa genera modelos con una calidad inferior a lo esperado y en la cual no se advierten los detalles finos. Como se evidencia en la Figura 56, la reconstrucción de la Rana ubicada en uno de los muros de la Universidad Pedagógica Nacional, después de muchos intentos se pudo obtener un resultado inferior a los vistos con anterioridad.



*Figura 58. Reconstrucción de la rana por medio del programa KScan3D. Retomado de KScan3D*

Ahora bien, en el programa los modelos generados no están alineados los escaneos que se hacen del objeto, esto repercute en la forma del mismo, además que no hay definición de los bordes, la resolución de los modelos es pésima, sumado a esto la portabilidad, es decir la capacidad de llevar el sensor y utilizar el programa en los lugares donde hay yacimientos arqueológicos sumado a la necesidad de una conexión a la corriente eléctrica y la imposibilidad de llevar el sensor a todos los rincones de la roca hacen de este programa una opción inviable y tampoco no útil para la documentación de yacimientos rupestres.

#### 4. Resultados experimentales

Este aparte del trabajo es resultado de la experimentación y de las pruebas hechas con cada uno de los diferentes programas consultados. Para ello se irán determinando las características básicas de los programas utilizados y especificándolas cada vez hasta llegar a los “*Criterios de Comparación*” inherentes a la documentación de yacimientos arqueológicos con arte rupestre.

##### Tablas

El primer acercamiento que se hizo al programa de generación de modelos 3D fue mediante la indagación por medio de la web, los cuales se pueden encontrar en la siguiente tabla, junto con una breve descripción del mismo.

##### Caracterización.

De las aplicaciones que fueron encontradas mediante la búsqueda en la web, se descartaron algunas debido a que sus características no se adaptaban al tipo de trabajo que se necesitaba o porque sus resultados en las pruebas iniciales fueron muy pobres, en la Tabla 2 se referencian cada uno de ellos. De igual manera se establece unas convenciones (Ver Figura 57) a las cuales les serán asignados unos valores numéricos para medir el progreso de cada una de las aplicaciones y graficar los resultados de manera que se entienda mejor los datos de la comparación hecha entre todos los programas.

Convención	Valor
	1
	2
	3

Figura 59. Convenciones utilizadas en las tablas para determinar la viabilidad de cada uno de los programas.

Después de hacer una primera valoración (Ver Tabla 2) de los programas que se utilizaron, se evaluarán los “*Criterios de Comparación*” los cuales fueron mencionados en la Metodología del documento, criterios principales que todo programa para generación de modelos 3D debe poseer.

TABLA PRIMER USO		
NOMBRE	VALORACIÓN PRIMER USO	OBSERVACIONES
3d- RePose Beta	✗	Aplicación Web. Su única función es generar diferentes elevaciones en las fotografías para simular un modelo 3D
3DSOM	!	Permite cargar fotos en alta resolución. Presenta problemas para encontrar las posiciones en las cuales ha sido tomada la fotografía, genera modelos sin una textura bien definida.
Agisoft Photo Scan	✓	El programa tiene una interfaz algo compleja, no es automático, requiere de la intervención del usuario en cada paso, los modelos generados son fieles al original en color, forma y textura, no presenta problemas con el fondo ni el entorno.
Arqball Spin	✗	Ya no se encuentra disponible.
Autodesk 123D Catch	✓	Aplicación Android, los modelos generados a pequeña escala son fieles al original en color, forma y textura, permite editar los
AutoDesk Remake®	✓	Es de primera mano, el programa que ha dejado los mejores resultados, los modelos generados son fieles al original en color, forma y textura, no presenta problemas con el fondo ni el entorno.
AutoDesk 360 Recap	✓	Es de primera mano, el programa que ha dejado los mejores resultados, los modelos generados son fieles al original en color, forma y textura, no presenta problemas con el fondo ni el entorno.
Harvest 4D	✗	Proyecto de la Universidad de Viena, no está habilitada la consulta. Los modelos encontrados en la búsqueda resultan fieles al original puesto como ejemplo.
Iberdrone	!	El proyecto está diseñado únicamente para fotografías tomadas desde un Dron . No se ajusta al objetivo del trabajo (Arte Rupestre)
SCANN3D	✓	Presenta muchos fallos al enviar las fotografías y construir el modelo, los modelos generados no son morfológicamente parecidos al original.
SentiSculpt SDK	✗	No es un programa que genere modelos 3D, únicamente permite editar mallas poligonales, es mejor conocido como Mesh Mixer.
Skanect	✓	El programa genera modelos que resultan ser fieles al original en color, forma y textura, no presenta problemas con el fondo ni el entorno, su manejo es algo complejo.
Video Trace	✗	En la información encontrada, informa que permite generar modelos 3D a partir de videos, pero no está disponible para su descarga.

<b>ReconstructMe</b>	✗	El programa genera modelos que resultan ser fieles al original en color y textura, lamentablemente deja muchos espacios en vacío, los detalles de los bordes no están bien trabajados. Su manejo es algo complejo, requiere de varios intentos obtener un modelo aceptable y su área de escaneo es muy reducida.
<b>KScan3D</b>	✗	El programa genera modelos con una pésima resolución, su función de alineación no sirve y los modelos generados forman una "sopa" de varias capturas sin que se note la forma original.
<b>3DSCAN</b>	!	No se pudo realizar la conexión entre el computador y el Kinect, se hicieron pruebas en computadores diferentes y el resultado siempre fue el mismo.

Tabla 2. Primer uso de los programas para generación de modelos 3D

Posterior a la eliminación de aquellas opciones que no eran viables y/o que generaban modelos que no cumplían con las especificaciones mínimas de calidad, se procede a evaluar los “*Criterios de Comparación*” que hacen que el programa sea útil para la documentación de los yacimientos, como la capacidad de funcionar de manera off Line, debido a que en el entorno de trabajo no se tiene acceso a ningún tipo de señal, por ende el procesamiento del modelo debe hacerse *in situ*, de igual manera se tendrá especial énfasis en la facilidad de uso de la herramienta.

Estos “*Criterios de Comparación*” serán divididos en tres grandes grupos dentro de los cuales se encontrará Características Básicas, las cuales hacen referencia a las cualidades que cualquier programa debe cumplir para ser eficiente, posteriormente vendrán las Características propias del modelado 3D, es decir las cualidades a evaluar dentro de los programas de modelado 3D y finalmente se encontrarán las características esenciales de documentación de yacimientos rupestres, las cuales son aquellas características inherentes a los yacimientos rocosos que serán documentados.

## Características Básicas

<b>Ergonomía</b>		
<b>NOMBRE</b>	<b>VALORACIÓN ERGONOMÍA</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
<b>3DSOM</b>	✓	Su manejo es sencillo, únicamente necesita cargar las fotografías para permitir generar el modelo 3D. Por ello solamente necesita de una cámara que capte las fotos.
<b>Agisoft Photo Scan</b>	✓	Su manejo es sencillo, únicamente necesita cargar las fotografías para permitir generar el modelo 3D. Por ello solamente necesita de una cámara que capte las fotos.
<b>Autodesk 123D Catch</b>	✓	El software proporciona las herramientas para tomar adecuadamente las fotografías. La generación de modelos 3D no necesita de muchos pasos. Se necesita solamente de un celular con conexión a internet.
<b>AutoDesk Remake®</b>	✓	Su manejo es sencillo, solamente necesita de cargar las fotografías para permitir generar el modelo 3D. El servidor en la nube se encarga de la generación del modelo o si se tiene el hardware necesario se puede hacer de manera local.
<b>AutoDesk 360 Recap</b>	✓	Su manejo es sencillo, solamente necesita de cargar las fotografías para permitir generar el modelo 3D. El servidor en la nube se encarga de la generación del modelo.
<b>SCANN3D</b>	✓	El software proporciona las herramientas para tomar adecuadamente las fotografías. La generación de modelos 3D no necesita de muchos pasos. Se necesita solamente de un celular con conexión a internet.
<b>Skanect</b>	✗	Se debe llevar el Kinect alrededor del objeto que se desea escanear, teniendo especial cuidado de no hacer movimientos bruscos. Si se desea escanear objetos grandes cualquier movimiento perturba el escaneo, ocasionando pérdida de información
<b>ReconstructMe</b>	✗	Se debe tener especial cuidado en no hacer movimientos que puedan causar pérdidas de información, lamentablemente su área de escaneo está limitada a objetos de 4x4 metros
<b>KScan3D</b>	✗	Se debe tener especial cuidado en no hacer movimientos que puedan causar pérdidas de información, su función de alineación no funcionó como se esperaba.










Tabla 3. Ergonomía de los programas seleccionados, describe la facilidad de uso del programa

<b>Automatización</b>		
<b>NOMBRE</b>	<b>VALORACIÓN AUTOMATIZACIÓN</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
<b>3DSOM</b>	✗	Cargar las fotografías es sencillo, aunque para generar el modelo 3D se necesita seguir varios pasos, los cuales no están bien especificados, por lo cual el proceso de creación de los modelos no es automático
<b>Agisoft Photo Scan</b>	✗	Cargar las fotografías es sencillo, aunque para generar el modelo 3D se necesita seguir varios pasos, los cuales no están bien especificados, por lo cual el proceso de creación de los modelos no es automático
<b>Autodesk 123D Catch</b>	✓	El software proporciona las herramientas para tomar adecuadamente las fotografías. La generación de modelos 3D es automática desde los servidores de AutoDesk.
<b>AutoDesk Remake®</b>	✓	El software proporciona las herramientas para tomar adecuadamente las fotografías. La generación de modelos 3D es automática desde los servidores de AutoDesk.
<b>AutoDesk 360 Recap</b>	✓	El software proporciona las herramientas para tomar adecuadamente las fotografías. La generación de modelos 3D es automática desde los servidores de AutoDesk.
<b>SCANN3D</b>	✓	Su manejo es sencillo y la generación de los modelos 3D es automática
<b>Skanect</b>	!	El modelo es generado durante el proceso de escaneo por ello es necesario no hacer movimientos bruscos para que no haya pérdida de información
<b>ReconstructMe</b>	!	El modelo es generado durante el proceso de escaneo por ello es necesario no hacer movimientos bruscos, el escaneo debe hacerse muy lentamente para que no haya pérdida de información, debido a que el error de posición es muy recurrente.
<b>KScan3D</b>	✗	El escaneo del objeto de por sí es difícil, el programa solo toma algunas partes del objeto por cada escaneo, la función alinear debería organizar todos los escaneos en un solo modelo sólido, infortunadamente esta herramienta no sirve y genera una masa de capturas que no poseen una forma específica.

*Tabla 4.* Automatización de los programas utilizados, describe la cantidad de pasos que se debe realizar antes de generar un modelo.

<b>Aprendizaje</b>		
<b>NOMBRE</b>	<b>VALORACIÓN APRENDIZAJE</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
<b>3DSOM</b>	✗	No tiene ninguna herramienta de aprendizaje, ni consejos para su uso, esto es enormemente negativo puesto que su funcionamiento no es intuitivo
<b>Agisoft Photo Scan</b>	✗	El proceso de generación de modelos 3D pasa por varias etapas, aunque estas pueden ser memorizadas fácilmente.No cuenta con un tutorial de entrada.
<b>Autodesk 123D Catch</b>	✓	La app es muy intuitiva la generación de modelos es automática y aparte de esto al inicio del programa se muestra su modo de uso por medio de un mini tutorial.
<b>AutoDesk Remake®</b>	✓	Lo único que necesita el programa para generar modelos 3D es cargar las fotografías, aunque si hace falta un poco de información acerca de la cantidad de fotografías que acepta y de qué tipos de formatos recibe
<b>AutoDesk 360 Recap</b>	✓	Lo único que necesita el programa para generar modelos 3D es cargar las fotografías, aunque si hace falta un poco de información acerca de la cantidad de fotografías que acepta y de qué tipos de formatos recibe
<b>SCANN3D</b>	✓	Cuenta con un mini tutorial muy detallado en el cual se explica el proceso para tomar las fotos y para obtener los mejores resultados. La generación de modelos 3D es automática.
<b>Skanect</b>	!	No cuenta con tutorial. El modelo 3D es generado automáticamente
<b>ReconstructMe</b>	✗	No cuenta con tutorial. El programa debería tener un tutorial sobre su manejo, en ocasiones resulta confuso.
<b>KScan3D</b>	✗	No cuenta con tutorial. El programa debería tener un tutorial sobre su manejo, en ocasiones resulta confuso.

*Tabla 5.* Aprendizaje de los programas, describe que tan fácil es de aprender y si el programa cuenta o no con un tutorial.

<b>Tolerancia a errores</b>		
<b>NOMBRE</b>	<b>VALORACIÓN TOLERANCIA</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
<b>3DSOM</b>		Cargando las fotos tiene errores recurrentes en el análisis de las distancias de las cámaras, es decir de 5 intentos falla al menos 3 veces. El programa se detiene cuando se trata de generar texturas de los modelos.
<b>Agisoft Photo Scan</b>		Por más carga que tenga el programa (cantidad de fotos), Agisoft Photo Scan falla solo eventualmente, es decir de 10 intentos falla 1 vez máximo.
<b>Autodesk 123D Catch</b>		La conexión con el servidor genera bastantes errores y muchas veces se pierde el trabajo, generalmente falla en la generación del modelo. Falla 2 de 5 intentos.
<b>AutoDesk Remake®</b>		La conexión con el servidor es buena aunque algunas veces se pierde el trabajo. Falla 1 de 5 intentos.
<b>AutoDesk 360 Recap</b>		La conexión con el servidor es buena aunque algunas veces se pierde el trabajo. Falla 1 de 5 intentos.
<b>SCANN3D</b>		La conexión con el servidor genera bastantes errores y muchas veces se pierde el trabajo, generalmente falla en la generación del modelo. Falla 4 de 5 intentos.
<b>Skanect</b>		Tiene una excelente tolerancia a fallos de 10 pruebas falla 1 sola vez
<b>ReconstructMe</b>		Tiene una tendencia a fallar tan solo escaneando los objetos.
<b>KScan3D</b>		No tiene fallas al generar un modelo 3D de un objeto estático, pero al empezar a mover el Kinect alrededor del objeto para obtener una vista de 360 grados el programa no es capaz de generar un modelo sólido. Genera el modelo pero con una calidad pésima.

*Tabla 6.* Tolerancia a los errores, describe que tan proclive es el programa a generar errores y como se recupera de estos.



### Características Propias del Modelado

Tiempo empleado		
NOMBRE	VALORACIÓN TIEMPO	OBSERVACIONES
3DSOM	✗	Generando la nube de puntos el programa es muy bueno, este proceso tan solo tarda 10 minutos, pero cuando se va a generar una malla o una textura del mismo objeto, generalmente cae en errores y no permite generar el modelo completo
Agisoft Photo Scan	!	Dependiendo de la calidad del modelo que se quiera obtener PhotoScan puede tardar entre 1 hora y 76 horas. (Teniendo en cuenta que las especificaciones de Hardware del computador utilizado para hacer las pruebas era Básica)
Autodesk 123D Catch	!	Tarda generalmente con un objeto de dimensiones considerables alrededor de una hora y media.
AutoDesk Remake®	!	Dentro de los programas para generación de modelos este se destaca por su rapidez, generalmente después de 20 minutos se tiene un modelo 3D, esto es debido a que el escaneo se hace desde los servidores de AutoDesk. Aunque dicha velocidad en la generación de modelos está intrínsecamente ligada a la limitada cantidad de fotos que puede procesar
AutoDesk 360 Recap	!	Dentro de los programas para generación de modelos este se destaca por su rapidez, generalmente después de 20 minutos se tiene un modelo 3D, esto es debido a que el escaneo se hace desde los servidores de AutoDesk. Aunque dicha velocidad en la generación de modelos está intrínsecamente ligada a la limitada cantidad de fotos que puede procesar
SCANN3D	!	El programa tarda con objetos de mediano tamaño alrededor de 45 minutos en generar un modelo 3D.
Skanect	✓	La velocidad de generación del modelo 3D es instantánea, es decir mientras se va escaneando el objeto este programa automáticamente va generando el modelo 3D
ReconstructMe	✓	La velocidad de generación del modelo 3D es instantánea, es decir mientras se va escaneando el objeto este programa automáticamente va generando el modelo 3D
KScan3D	✓	La velocidad de generación del modelo 3D es instantánea, es decir mientras se va escaneando el objeto este programa automáticamente va generando el modelo 3D

Tabla 7. Tiempo empleado. Describe el tiempo que utiliza el programa en generar un modelo 3D.










<b>Calidad de los Modelos (Valor doble)</b>		
<b>NOMBRE</b>	<b>VALORACIÓN CALIDAD</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
<b>3DSOM</b>		El programa es capaz de generar una nube de puntos, desde la cuál claramente puede advertirse la forma del objeto, infortunadamente casi siempre falla en la generación de una malla o de una textura
<b>Agisoft Photo Scan</b>		Los modelos generados son fieles al original, tanto en tamaño, forma, color, textura. El programa no deja espacios vacíos en el modelo.
<b>Autodesk 123D Catch</b>		Los modelos generados son fieles al original, tanto en tamaño, color, textura. El programa no deja espacios vacíos en el modelo. Se debe mejorar en la forma del objeto generado ya que en algunas ocasiones la forma presenta alteraciones.
<b>AutoDesk Remake®</b>		Los modelos generados tienen una calidad óptima, infortunadamente su capacidad de procesamiento de hace que solamente se puedan procesar 50 imágenes, esto hace que el modelo sea pequeño en comparación con el objeto real.
<b>AutoDesk 360 Recap</b>		Los modelos generados tienen una calidad óptima, infortunadamente su capacidad de procesamiento de hace que solamente se puedan procesar 50 imágenes, esto hace que el modelo sea pequeño en comparación con el objeto real.
<b>SCANN3D</b>		Los modelos generados, tienen el color y la textura del original, lamentablemente tiene errores muy profundos en la generación de la forma correcta de los mismos, el motor de ensamblaje del modelo parece no detectar las distancias correctamente, lo cual tiene como resultado un modelo 3D dentro del cual las capturas no coinciden y no generan un modelo sólido.
<b>Skanect</b>		Los modelos generados son fieles al original, tanto en tamaño, forma, color, textura. El programa no deja espacios vacíos en el modelo.
<b>ReconstructMe</b>		Los modelos generados son fieles al original, tanto en tamaño, forma, color, textura. El programa deja espacios vacíos en el modelo y los bordes generalmente están mal terminados, es decir no suaviza los bordes del modelo.
<b>KScan3D</b>		No alinea los escaneos que se hacen del objeto, esto repercute en la forma del mismo, no hay definición de los bordes, la resolución de los modelos es pésima.

Tabla 8. Calidad de los modelos, describe las similitudes entre el objeto real y el modelo 3D generado.

<b>Inter Operatividad (Exportación de modelos)</b>		
<b>NOMBRE</b>	<b>VALORACIÓN INTER</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
<b>3DSOM</b>	✓	Permite exportar modelos en formato Obj, Pcd, Ply y Stl, su interfaz de exportación es sencilla.
<b>Agisoft Photo Scan</b>	✓	Permite exportar modelos en formato Obj, Fbx y Kmz, su interfaz de exportación tiene varias opciones muy útiles
<b>Autodesk 123D Catch</b>	✗	El programa no permite exportar objetos.
<b>AutoDesk Remake®</b>	✓	Permite exportar modelos en formato FBX, OBJ, OBJ (QUADS) y PLY
<b>AutoDesk 360 Recap</b>	✓	Permite exportar modelos en formato FBX, OBJ, OBJ (QUADS) y PLY
<b>SCANN3D</b>	✓	Permite exportar modelos en formato Obj, Pcd, Ply y Stl, su interfaz de exportación es sencilla.
<b>Skanect</b>	✓	Permite exportar modelos en formato PLY, VRLM, OBJ y STL
<b>ReconstructMe</b>	✓	Se pueden exportar fácilmente a los diferentes programas CAD con diferentes formatos como PLY, OBJ, STL, 3DS
<b>KScan3D</b>	✓	Se pueden exportar fácilmente a los diferentes programas CAD con diferentes formatos como PLY, OBJ, STL Y ASC

*Tabla 9. Inter operatividad, describe la capacidad del programa de exportar los modelos a otros tipos de formato.*

<b>Valor Agregado (Otras funciones)</b>		
<b>NOMBRE</b>	<b>VALORACIÓN VALOR AGREGADO</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
<b>3DSOM</b>	!	El valor agregado consiste en que nos permite eliminar automáticamente el fondo de las imágenes tomadas, dejando únicamente el objeto seleccionado
<b>Agisoft Photo Scan</b>	✓	El programa tiene varios valores agregados, primero que todo la extensa documentación que sobre el mismo se encuentra y no únicamente sobre objetos pequeños sino sobre cuevas y otros trabajos relacionados. También el programa posee en cada una de sus fases características que un usuario avanzado del programa podría explotar para generar el modelo con las características deseadas
<b>Autodesk 123D Catch</b>	✓	La característica más relevante del programa es la función de ayuda para toma de las fotos, esta función le permite a un usuario inexperto tomar adecuadamente cada una de las fotos, saber si falta un ángulo y llevar un registro de las fotos que ha tomado.
<b>AutoDesk Remake®</b>	✗	El programa no presenta ninguna característica especial para ser tomada en cuenta.
<b>AutoDesk 360 Recap</b>	✗	El programa no presenta ninguna característica especial para ser tomada en cuenta.
<b>SCANN3D</b>	!	Esta aplicación permite generar modelos 3D a partir de fotografías tomadas desde otro dispositivo. Lamentablemente casi siempre falla en la generación del modelo pero es una característica interesante.
<b>Skanect</b>	✓	El proceso realizado por fases le permite al usuario saber con exactitud que paso es el que debe seguir, una vez generado el modelo el programa brinda muchas opciones de edición y de mejoramiento del modelo 3D
<b>ReconstructMe</b>	!	El programa no presenta ninguna característica especial para ser tomada en cuenta.
<b>KScan3D</b>	!	El programa tiene funciones que pueden resultar importantes pero debido a los errores tan profundos en la generación de los modelos, no se pueden poner a prueba

Tabla 10. Valor agregado de las aplicaciones, describe aquellas características relevantes del programa.

Características propias del modelado de arte rupestre

<b>Portabilidad (Valor triple)</b>		
<b>NOMBRE</b>	<b>VALORACIÓN PORTABILIDAD</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
<b>3DSOM</b>	✓	Solo se necesita de una buena cámara para tomar las fotos y cargarlas al programa. No necesita de Wifi ni de una conexión a la corriente eléctrica.
<b>Agisoft Photo Scan</b>	✓	Solo se necesita de una buena cámara para tomar las fotos y cargarlas al programa. No necesita de Wifi ni de una conexión a la corriente eléctrica.
<b>Autodesk 123D Catch</b>	!	Solo se necesita de una buena cámara para tomar las fotos y cargarlas al programa. Necesita de una conexión wifi para crear el modelo, no necesita otras conexiones
<b>AutoDesk Remake®</b>	!	Solo se necesita de una buena cámara para tomar las fotos y cargarlas al programa. Necesita de Wifi y no de una conexión a la corriente eléctrica.
<b>AutoDesk 360 Recap</b>	!	Solo se necesita de una buena cámara para tomar las fotos y cargarlas al programa. Necesita de Wifi y no de una conexión a la corriente eléctrica.
<b>SCANN3D</b>	✗	Solo se necesita de una buena cámara para tomar las fotos y cargarlas al programa. Necesita de una conexión wifi para crear el modelo, no necesita otras conexiones
<b>Skanect</b>	✗	Necesita de una conexión a la corriente eléctrica debido a que el Kinect no tiene una fuente de poder propia, la luz ultravioleta hace que los resultados no sean óptimos
<b>ReconstructMe</b>	✗	Necesita de una conexión a la corriente eléctrica debido a que el Kinect no tiene una fuente de poder propia, la corriente ultravioleta hace que los resultados no sean óptimos
<b>KScan3D</b>	✗	Necesita de una conexión a la corriente eléctrica debido a que el Kinect no tiene una fuente de poder propia, la luz ultravioleta hace que los resultados no sean óptimos

*Tabla 11.* Portabilidad, describe la facilidad de uso de la herramienta y su autonomía para generar los modelos 3D.

Todos los datos de las comparaciones hechas fueron consignados en la Tabla 12, la cual permite observar la calificación de los programas, en ella puede verse como los programas de la serie AutoDesk están muy cerca de la calificación obtenida por PhotoScan y realmente es que habría sido muy difícil catalogar cual de estos programas es el más adecuado para documentar los yacimientos rupestres de no ser por la limitación en la cantidad de imágenes que son capaces de procesar, sumado a que PhotoScan no necesita de conexión a internet para generar los modelos.

<b>NOMBRE</b>	<b>VALORACIÓN TOTAL</b>
<b>3DSOM</b>	22
<b>Agisoft Photo Scan</b>	31
<b>Autodesk 123D Catch</b>	26
<b>AutoDesk Remake®</b>	28
<b>AutoDesk 360 Recap</b>	28
<b>SCANN3D</b>	24
<b>Skanect</b>	28
<b>ReconstructMe</b>	22
<b>KScan3D</b>	22

*Tabla 12.* Resultados numéricos de la comparación de los programas.

De igual manera se agrega una gráfica la cual permite ver el comportamiento de los tres programas sobresalientes (PhotoScan, AutoDesk Remake y Skanect), así como una tabla que permite comprarar todos los resultados obtenidos.

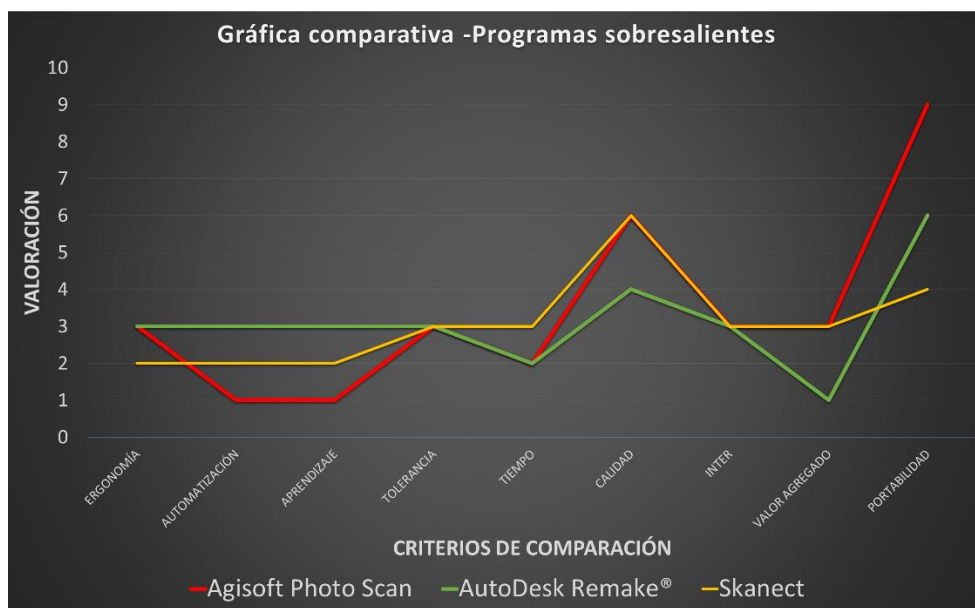


Figura 60. Grafica comparativa entre los mejores programas utilizados

NOMBRE	TABLA COMPARATIVA FINAL								
	ERGONOMÍA	AUTOMATIZACIÓN	APRENDIZAJE	TOLERANCIA	TIEMPO	CALIDAD	INTER	VALOR AGREGADO	PORTABILIDAD
3DSOM	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✓	!	✓
Agisoft Photo Scan	✓	✗	✗	✓	!	✓	✓	✓	✓
Autodesk 123D Catch	✓	✓	✓	!	!	!	✗	✓	!
AutoDesk Remake®	✓	✓	✓	✓	!	!	✓	✗	!
AutoDesk 360 Recap	✓	✓	✓	✓	!	!	✓	✗	!
SCANN3D	✓	✓	✓	✗	!	✗	✓	!	✗
Skanect	✗	!	!	✓	✓	✓	✓	✓	✗
ReconstructMe	✗	!	✗	✗	✓	!	✓	!	✗
KScan3D	✗	✗	✗	!	✓	!	✓	!	✗

Tabla 13. Tabla comparativa final, describe todos los resultados obtenidos en las diferentes pruebas.

## Conclusiones

La documentación de los yacimientos arqueológicos demanda herramientas autónomas que no requieran medios externos para poder ser utilizadas, en el desarrollo de este

documento se pudo evidenciar como algunos programas que se perfilaban como candidatos idóneos para realizar la documentación de un yacimiento rupestre, se convirtieron en opciones no viables con el pasar de las prueba, debido a las limitantes propias del terreno y del objeto a escanear. Al ser el primer trabajo de este tipo que se desarrollaba en el municipio de Bojacá no se encontró mucha documentación sobre la metodología adecuada para comparar los programas, ni los modelos generados.

Skanect fue uno de los programas cuyos modelos 3D destacan por su gran exactitud y similitud con el objeto original, este se convertiría en una opción inviable para llevar a cabo la documentación de los yacimientos rocosos, debido a la necesidad del sensor Kinect de una conexión con la corriente eléctrica, de igual manera el escaneo de una roca de las dimensiones de yacimiento del municipio de Bojacá haría necesario la implementación de un nuevo artefacto que facilitara el movimiento del sensor alrededor de una roca de grandes dimensiones, de igual manera sucedió con los programas de modelado 3D proporcionados por AutoDesk (Remake y 360 Recap) cuyos modelos 3D en cuanto a la forma, color, textura y dimensiones eran idénticos al real y cuyos resultados los perfilaban como candidatos seguros a realizar una documentación del arte rupestre satisfactoria, se vieron opacados debido a que la cantidad de fotografías que podrían procesar era limitada (50 fotografías) esto limitaba enormemente el tamaño del modelo a crear y por lo tanto influía enormemente en su valoración final, Photo Scan de Agisoft, no fue coincidencia, su elección como el programa con el mejor rendimiento, debido a que PhotoScan posee una de las características decisivas en la documentación de yacimientos rupestres como la portabilidad, es decir la capacidad de llevar las aplicaciones a cualquier lugar, ya que por regla general los yacimientos arqueológicos quedan en zonas muy apartadas, otra característica muy importante es la maniobrabilidad debido a que esta permite realizar la documentación del yacimiento rocoso sin tener que acudir a técnicas y a otros accesorios para hacer llegar el sensor a las zonas más



alejadas de la roca. Agisoft PhotoScan reúne todas estas características, su fácil manejo, su maniobrabilidad, su independencia y la calidad de los modelos generados hacen de este programa el más adecuado para generar modelos 3D de yacimientos rocosos.

## 5. Bibliografía

1. Agisoft, L. L. C. (2014). Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition.
2. Arias-Cabarcos, P., Marín, A., Palacios, D., Almenárez, F., & Díaz-Sánchez, D. (2016). Comparing Password Management Software: Toward Usable and Secure Enterprise Authentication. *IT Professional*, 18(5), 34-40.
3. Bednarik, Robert. A taphonomy of paleoart. *Antiquity*. 68: 68-74.  
[http://cogweb.ucla.edu/ep/Art/Bednarik\\_94.html](http://cogweb.ucla.edu/ep/Art/Bednarik_94.html) 1994.
4. Brutto, M. L., & Meli, P. (2012). Computer vision tools for 3D modelling in archaeology. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 1(1\_suppl), 1-6.
5. Bures, M., & Polcar, J. (2016, December). Comparison of 3D scanning and 3D modelling of a workplace from various aspects. In *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2016 IEEE International Conference on* (pp. 306-310). IEEE.
7. Caro, J. L. (2012). Fotogrametría y modelado 3D: un caso práctico para la difusión del patrimonio y su promoción turística.
8. Di Ruscio, D., Kolovos, D. S., Korkontzelos, Y., Matragkas, N., & Vinju, J. (2016, September). Supporting Custom Quality Models to Analyse and Compare Open-Source Software. In *Quality of Information and Communications Technology (QUATIC), 2016 10th International Conference on the* (pp. 94-99). IEEE.
9. E. Paquet and M. Rioux, Nefertiti: a Query by Content Software for Three-Dimensional Databases Management, Proc. *Int'l Conf. on Recent Advances in 3-D Digital Imaging*

10. GIPRI, G. C., Guillermo MUÑOZ, G. M. C., & Carlos Rodriguez, C. R. M. (2015).  
Catalogación, Documentación, Primeros-Diagnósticos y Valoración del Arte  
Rupestre del Municipio de Pandi, Cundinamarca Convenio No. 220 de 2015  
Gobernación de Cundinamarca, Idecut-Municipio de Pandi Convenio No. 106 de  
2015 Municipio de Pandi-Corporación Gipri Colombia.
11. Granero, L., Díaz, F., Millet, F., Domínguez, R., & Sanjuán, Y. (2011). Tecnologías  
ópticas aplicadas a la visualización y presentación 3D de patrimonio. Caso práctico  
de la Virgen del Rebollet de Oliva. *Virtual Archaeology Review*, 2(3), 43-47.
12. Habib, A. F., Ghanma, M., Al-Ruzouq, R., & Kim, E. (2004). 3d modelling of  
historical sites using lowcost digital cameras. En Xxxvth congress of isprs. ISPRS.
13. Herbert Edelsbrunner, Ernst P. Mücke, Three-dimensional Alpha Shapes, ACM  
TOG, 13(1), pp. 43-72, (1994)
14. Hernández, J., & Prieto, F. (2007). Metodología de evaluación cuantitativa de  
modelos texturados. *Dyna*, (151), 115-124.
15. Jiménez, J. G., García, M., Revelles, J., & Melero, F. J. (2012). Digitalización 3D y  
difusión en web del patrimonio de las universidades andaluzas mediante X3D y  
WebGL. *Virtual Archaeology Review*, 3(7), 55-59.
16. Laksono, D. (2016, August). Open source stack for Structure from Motion 3D  
reconstruction: A geometric overview. In *Engineering Seminar (InAES),  
International Annual* (pp. 196-201). IEEE.
17. Longuet-Higgins, H. C. (1981). A computer algorithm for reconstructing a scene  
from two projections. *Nature*, 293, 133{135.

18. LÓPEZ MONTALVO, E. (2010). Imágenes en la roca: del calco directo a la era digital en el registro gráfico del arte rupestre levantino. *CLIO–Série Arqueológica, Recife*, 25(1), 153-190.
19. López-Menchero Bendicho, V. M., & Serio Tejero, I. (2011). La puesta en valor del arte rupestre: nuevas técnicas de presentación de un patrimonio singular. *Estrat crític*, 5(1), 0022-031.
20. López-Menchero Bendicho, V. M., & Serio Tejero, I. (2011). La puesta en valor del arte rupestre: nuevas técnicas de presentación de un patrimonio singular. *Estrat crític*, 5(1), 0022-031.
21. Manferdini, A. M., & Galassi, M. (2013). Assessments for 3d reconstructions of cultural heritage using digital technologies. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-5 W, 1*, 167-174.
22. Martinez Celis, D., Figue, S., Rodriguez Larrota, M., & Mendoza Lafaurie, S. (2015). Inventario de sitios con arte rupestre del Municipio de Bojacá, Cundinamarca (Colombia).
23. Martínez Celis, Diego y Botiva Contreras. Alvaro. Manual de arte rupestre en Cundinamarca. ICANH – Gobernacion de Cundinamarca. Primera edicion, Bogota, 2002. (Segunda edicion, 2004).
24. Moure Romanillo, a. (1982): “La conservación del arte rupestre español” en *Revista de Arqueología*, nº 22, pp. 54-55.

25. Moure Romanillo, a. (1999): “Arte rupestre y sociedad. Conservación y divulgación”, en A Moure Romanillo, *Arqueología del arte rupestre en la Península Ibérica*, Madrid, Síntesis, pp. 177-198.
26. Muñoz, G. (1999). Arte rupestre en Colombia: Un modelo educativo de recuperación y estudio del patrimonio rupestre. *FOLIOS*, 11, 1-9.
27. Muñoz, G., Trujillo, J., Rodriguez Martinez, C. A., & Riveros, N. (2014). Arte rupestre en Choachí. Informe final Agosto 2014.
28. Naranjo Sánchez, B. A. (2015). Calidad del software educativo: Metodología de Evaluación de software educativo para determinar el que cumple con las especificaciones basadas en estándares internacionales.
29. Ohbuchi, R., & Takei, T. (2003, October). Shape similarity comparison of 3D models using alpha shapes. In *Computer Graphics and Applications, 2003. Proceedings. 11th Pacific Conference on* (pp. 293-302). IEEE.
30. ORTEGA GONZALEZ, E. V. (2008). *Una técnica para el análisis de similitud entre imágenes* (Doctoral dissertation).
31. Política para promover la apropiación social del patrimonio a través de la participación comunitaria. En <http://www.mincultura.gov.co/?idcategoria=23394>. 2010
32. Sakaguchi, Y., Ishio, T., Kanda, T., & Inoue, K. (2015, September). Extracting a unified directory tree to compare similar software products. In *Software Visualization (VISSOFT), 2015 IEEE 3rd Working Conference on* (pp. 165-169). IEEE.

33. Sanz, I. D., Bonilla, V. V., Montalvo, E. L., García, J. L. L., & López, M. C. (2013). Reflexiones sobre las técnicas de documentación digital del arte rupestre: la restitución bidimensional (2D) versus la tridimensional (3D). In *Cuadernos de arte rupestre* (Vol. 6, pp. 21-32). Dirección General de Bienes Culturales de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.
34. Sipiran Mendoza, I. A. (2014). Local features for shape matching and retrieval.
35. Snavely, N., Seitz, S. M., & Szeliski, R. (2006, July). Photo tourism: exploring photo collections in 3D. In *ACM transactions on graphics (TOG)* (Vol. 25, No. 3, pp. 835-846). ACM.
36. Sona, G., Pinto, L., Pagliari, D., Passoni, D., & Gini, R. (2014). Experimental analysis of different software packages for orientation and digital surface modelling from UAV images. *Earth Science Informatics*, 7(2), 97-107.
37. Valle Chávez, A. (2016). Recuperación y comparación de figuras en 3D.
38. Wamg, & Ahmad, A. (2002). Digital architectural photogrammetric recording of historical building and monuments. *New Zeland Surveyor*(293), 25{30.
39. Wessex Archaeology. (2007). A virtual stonehenge landscape.  
<https://vimeo.com/387367> acc.sept. 2012.
40. Wu, K. (1996). *Computing parametric geon descriptions of 3d multi-part objects* (Doctoral dissertation, McGill University).

## 6. Anexos

### Cartilla explicativa del uso de la herramienta Agisoft PhotoScan

La cartilla es un entregable derivado de la documentación y de la experimentación realizada durante este trabajo.<sup>23</sup>

### Técnicas de comparación de modelos 3D cualitativas.

En “*Shape similarity comparison of 3D models using alpha shapes. In Computer Graphics and Applications*” se describen los hallazgos preliminares en la aplicación de una técnica de análisis multi-resolución, igualmente a lo largo del documento se establece que analizar el código de un programa o de una aplicación es difícil y que para evaluar su rendimiento lo mejor es tener sistemas de búsqueda y recuperación basado en formas 3D, en los cuales lo más importante será la forma, detalles y exactitud de los mismos. Para comenzar a desarrollar un sistema de análisis de similitud de formas es necesario saber el tipo de representación de forma que el sistema acepta. Los modelos CAD 3D o superficies de colector son muy importantes. Los sólidos y colectores (superficies de malla) son susceptibles a muchas técnicas de análisis. Dentro de los formatos de representación de formas más importantes se definen como sopa de polígono (VRLM, MPEG-4, SNHC VRLM)<sup>24</sup>.

Al igual se establece la necesidad de desarrollar un algoritmo de búsqueda de similitud de forma para modelos con el formato de “sopa de polígono”. En el artículo (“*Shape similarity comparison of 3D models using alpha shapes. In Computer Graphics and Applications*”) también se aclara que en el campo de la búsqueda basada en contenido y la recuperación de

---

<sup>23</sup> Version para descarga en el siguiente link:

<https://wettransfer.com/downloads/f6ae5b64ff1ab7022b4d5c89fcf4417b20170802002639/384cd0da5a988f9735d3d6a6073c69b320170802002639/0e8d08>

<sup>24</sup> Ver el glosario

imágenes 2D, la forma de un objeto es una de las más importantes de las características, además de color, textura y otros. Al evaluar la forma y la textura de los objetos en las imágenes, muchas técnicas de análisis de imágenes de dominio de frecuencia y multi-resolución resultan ser herramientas muy potentes. Ejemplos de tales técnicas incluyen, la transformada de Fourier, varias pirámides basadas en olas, pirámide laplaciana, pirámide gaussiana y pirámides morfológicas. El dominio de frecuencia y las técnicas de análisis multi-resolución encontraron sus caminos en el procesamiento de superficies de dos colectores incrustadas en el espacio 3D. Sin embargo, estas técnicas de análisis basadas en dos colectores no son directamente aplicables a las formas 3D definidas como sopa poligonal, que no son colectores. (Ohbuchi, R., & Takei, T. 2003,)<sup>25</sup>

Por esto, en el artículo se usa el algoritmo de formas 3D Alpha, para crear una jerarquía multi-resolución de formas desde el modelo 3D dado. De igual manera, aplicaron un descriptor de forma única a cada uno de los modelos y a múltiples niveles de resolución para derivar un descriptor multi-resolución de formas. Los descriptores visuales son el primer paso para encontrar la forma de los píxeles que componen una imagen, existen diferentes tipos pero en este artículo tan solo nombran a los descriptores de forma. Los descriptores de forma multi resolución resultan mejores para recuperar modelos 3D debido a que de acuerdo a los experimentos de evaluación, el rendimiento de la recuperación del descriptor multi

---

<sup>25</sup> *"In the field of content-based search and retrieval of 2D images, shape of an object is one of the most important of the features, in addition to color, texture and others. In analyzing shape and texture of objects in the images, many Frequency domain and multiresolution image analysis techniques are found to be very powerful tools. Examples of such techniques include, but not limited to, Fourier transform, various wavelet-based pyramids, Laplacian pyramid, Gaussian pyramid, and morphological pyramids [10, 25]. Frequency domain and multiresolution analysis techniques found their ways into processing of 2-manifold surfaces embedded in 3D space. However, these 2-manifold based analysis techniques are not directly applicable to 3D shapes defined as polygon soup, which are not manifolds"*



resolución, superó a su contra parte de resolución única, probando la eficacia del acercamiento básico. (Ohbuchi, R., & Takei, T. 2003,)<sup>26</sup>

Así mismo el artículo presenta un nuevo método alternativo para modelar la comparación de modelos 3D, en el que se emplea el enfoque de análisis multi-resolución sin confiar en la voxelización es decir, la segmentación en partes de los modelos 3D lo cuales permiten conformar conjuntos volumétricos los cuales facilitan obtener profundidad en la imagen. A partir de un modelo 3D de sopa de polígono de entrada, el método descrito en el artículo calcula una representación multi-resolución 3D (MRR) basada en n-muestras usando las formas alfa tridimensionales propuestas por Edelsbrunner<sup>27</sup>.

### **Trabajo Previo**

En este documento se establecen que hay cuatro pasos principales en la recuperación basada en la forma de modelos 3D de una base de datos de modelos 3D (Ver Figura xxx.) Y estos son:

1. Formación de consultas: Formar y presentar una consulta. Las alternativas para consultar formas 3D incluyen una forma 3D dada a priori, un esbozo 3D de la forma 3D, o un boceto 2D de una forma 3D.
2. Extracción de características: Se extraen los vectores de características, o el descriptor de forma, del modelo que se usará para el cálculo de similitud de forma (más a menudo, disimilaridad). La representación en forma de los modelos 3D objetivo influye en las características de forma que se pueden emplear.

---

<sup>26</sup> "According to our evaluation experiments, the retrieval performance of our multiresolution descriptor outperformed its single resolution counterpart, proving the effectiveness of the basic approach."

<sup>27</sup> Herbert Edelsbrunner, Ernst P. Mücke, Three-dimensional Alpha Shapes, ACM TOG, 13(1), pp. 43-72, (1994)

3. Cálculo de disimilaridad: Calcula el valor de disimilitud entre las formas. Por lo general, se espera que los valores de disimilitud reflejen los juicios humanos.
4. Recuperación: Recuperar eficientemente, de la base de datos, los modelos que tienen los valores de disimilitud más bajos.

A continuación, en el artículo se analizan los puntos 2 y 3, ya que el enfoque en este trabajo es un descriptor de forma y su método de cálculo de distancia. Un descriptor de forma puede ser clasificado por representaciones de forma 3D que acepta. El objetivo del artículo son superficies 3D con representaciones de forma. A grandes rasgos, una representación en forma de superficie en 3D puede clasificarse en sopa sólida, múltiple o poligonal.

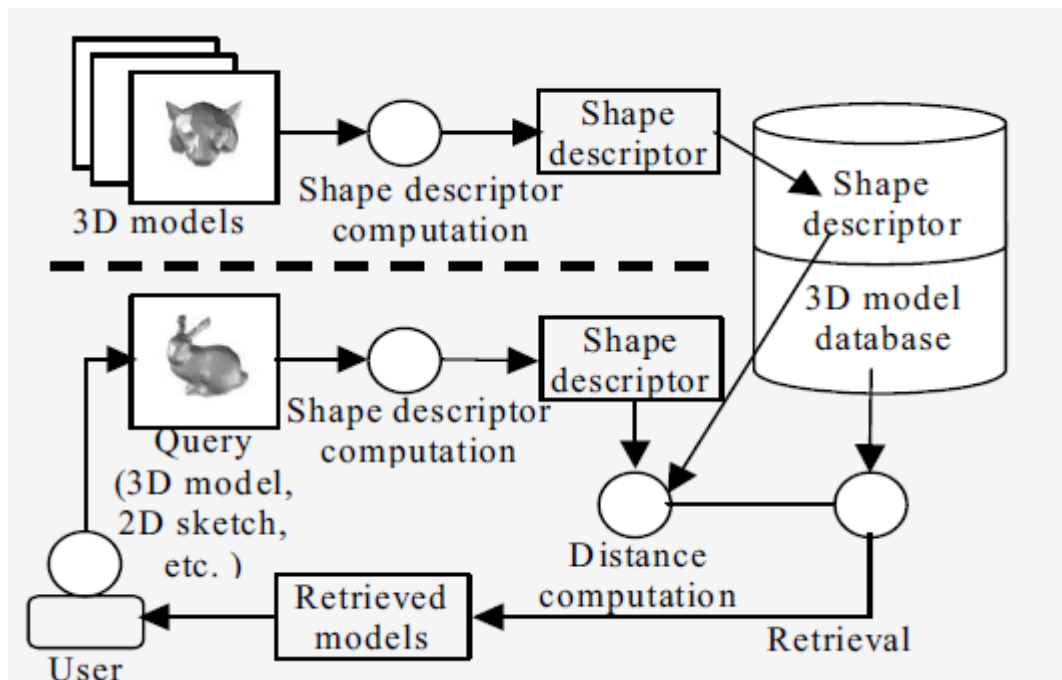


Figura 61. Diagrama genérico para la búsqueda de similitud de formas de los modelos 3D geométricos. Tomado de: Herbert Edelsbrunner, Ernst P. Mücke, Three-dimensional Alpha Shapes, ACM TOG, 13(1), pp. 43-72, (1994)

En este método se asume, como entrada los modelos definidos como sopa de polígono, en el proceso no se utiliza conectividad de las caras en la comparación de las formas, este acepta, pero simplemente ignora, cualquier cosa que no tenga área superficial, por ejemplo,

un polígono de área cero y una poli-línea. El método propuesto utiliza un descriptor de forma multi-resolución para la comparación de formas. Para ello, se calcula primero, a partir de un modelo 3D de sopa de polígono, una representación multi-resolución 3D (MRR) basada en n-simplices usando las formas alfa tridimensionales propuestas por Edelsbrunner<sup>28</sup>. (Para mayor brevedad, a continuación de este trabajo, para una mayor facilidad se nombrará a esta representación multi-resolución alfa o AMRR para abreviar). A continuación, el AMRR, que es un conjunto de formas alfa, el descriptor de forma multi-resolución se llama el AAD Multi-resolución Alfa (AMR-AAD) para que combinado con el descriptor de forma de Distancia de Ángulo Absoluto (AAD) con el AMRR. Se debe observar aquí que el AMRR es un marco de la multi-resolución no atado al descriptor de la forma de AAD. Cualquier descriptor de forma que satisfaga ciertos requisitos se puede utilizar con el AMRR. Una distancia entre un par de descriptores de forma AMR-AAD es la distancia, o la disimilitud del correspondiente para determinar la similitud de los modelos 3D. Los experimentos mostraron que el método de comparación de similitud de forma multi-resolución propuesto supera en rendimiento de recuperación a el método de resolución única usando el AAD

De igual manera se encontró en la información consultada que el proceso de evaluación de los modelos 3D puede dividirse en cuatro fases.

### ***1. Recolección de la Información***

El primer paso siempre es recolectar toda la información necesaria. Es importante es establecer un entorno de trabajo completo. Así que se tienen dos opciones para obtener las dimensiones requeridas del espacio de trabajo.

- La clásica y más comúnmente utilizada es medir las dimensiones directamente.

---

<sup>28</sup> Herbert Edelsbrunner, Ernst P. Mücke, Three-dimensional Alpha Shapes, *ACM TOG*, **13**(1), pp. 43-72, (1994)

- Escanear el objeto para obtener las dimensiones.

## **2. Construcción del Entorno Virtual**

Basándose en la fase anterior se puede crear un modelo 3D o la nube de puntos.

## **3. Evaluación Ergonómica**

Simulación y evaluación. Análisis ergonómico e interpretación de resultados.

## **4. Mejoras y Re-Evaluación**

El paso final implica requiere sugerencias para mejorar y re evaluar.

La re- evaluación es muy importante para estar seguro de que los cambios propuestos harán efecto. En esta clase también se incluye la creación de un pequeño reporte.

En el experimento que definía el artículo se han enfocado en la primera fase en el detalle. Se han analizado dos lugares de trabajo industriales y ambos han sido analizados por los ingenieros más altamente calificados.

Usualmente el ingeniero realiza tres análisis enfocados en:

- a. Evaluación de la postura de trabajo o del manejo del material y la maniobrabilidad.
- b. Maniobrabilidad o manejo del material.
- c. Parámetros del Scanner.

Claro está que el ingeniero a cargo de la evaluación debe tener en cuenta las siguientes especificaciones:

- a. Laser de pulso.
- b. Exactitud del escaneo (2mm)
- c. Rango (Mayor a 35 mts)
- d. Rango del Escaneo (25000 puntos/sec)

Antes de realizar el experimento, existían dos hipótesis respecto a los resultados.

- *Hipótesis 1:* El escaneo 3D es más rápido para obtener los datos digitalizados.  
La primera hipótesis está encaminada a medir o testear los tiempos de cada método. Se debe tener en cuenta que para el escaneo no es necesario medir.
- *Hipótesis 2:* En término de las salidas de los determinados métodos, el escaneo 3D es más preciso y no tiene errores debido a que no hay proceso de medición.  
La segunda hipótesis trabaja con la exactitud del software.
- La velocidad de adquisición de datos, tanto como la de procesamiento es mucho mayor, al menos unas cuatro veces superior cuando se usa el escaneo y no el modelado, por ende la hipótesis 1 del artículo queda completamente confirmada.
- Cuando se compara el modelo generado por el escaneo y el del modelado tradicional se encuentran diferencias varían entre los 3 y los 5 cm. Es aquí donde nacen los siguientes interrogantes: ¿Fue un error de vibración del suelo durante el escaneo?, ¿Es posible un error en las mediciones tomadas inicialmente?, ¿Puede darse un error en ambos?
- Sin embargo, tales diferencias no resultan relevantes en el análisis ergonómico de la estructura. Por lo tanto se tendría una confirmación parcial de la segunda hipótesis. Debido a los resultados experimentales, se concluyó que el método de escaneo 3D era en un promedio de cuatro veces más rápido que el modelado 3D clásico y también más preciso, por ello sería conveniente utilizar este método en particular. Sin embargo, el modelado 3d es estéticamente más agradable que el escaneo, por lo que sería mejor para propósitos de presentación. El costo del equipo para el escaneado en 3D también es considerable. Por lo general, la decisión sobre qué método utilizar es hecha por

la dirección de la empresa y utiliza software y equipos ya poseídos por la misma.

Asimismo en “Sipiran Mendoza, I. A. (2014). Local features for shape matching and retrieval. Valle Chávez, A. (2016). Recuperación y comparación de figuras en 3D”. Se puede encontrar otra metodología cuantitativa para el análisis de similitud de modelos 3D

La metodología propuesta en el documento es la siguiente:

1. Selección del conjunto de datos.
2. Procesamiento de cada figura 3D para control de puntos de rotación. Se debe tener en cuenta en este punto tanto la escala como la traslación.
3. Transformación del modelo de 3D a 1D
4. Comparación de las secuencias usando FDTW<sup>29</sup> (*Fast Dynamic Time Wrapping*) y la posterior construcción de la matriz distancias.
5. Uso de indicadores de recuperación para analizar el comportamiento y los resultados de la metodología de evaluación.

Dentro de los alcances de la propuesta, se delimitan aquellos objetos que no tienen asociados ni color ni textura, de igual manera no puede usarse esta metodología de evaluación a aquellos modelos que no encierran o delimiten una forma o que tienen partes desconectadas (Ver figura)

---

<sup>29</sup> **DTW** (*Dynamic Time Warping*) Es una técnica para cuantificar y obtener la alineación que representa la distancia mínima entre dos secuencias de datos bajo restricciones de monotonía.

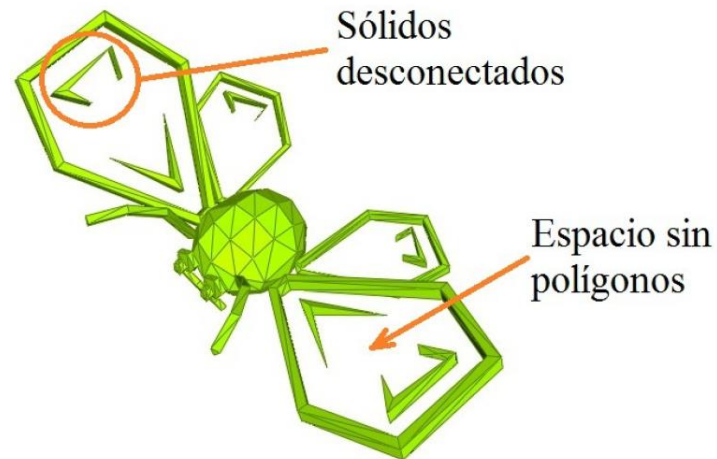


Figura 62. Ejemplo de figura con dificultades para una recuperación. Tomado de: "Sipiran Mendoza, I. A. (2014). Local features for shape matching and retrieval. Valle Chávez, A. (2016). Recuperación y comparación de figuras en 3D"

Ahora bien, una vez definidos los alcances de la propuesta en el documento se empiezan a definir las características primarias de un objeto 3D, Los objetos 3D están generalmente representado en las siguientes formas:

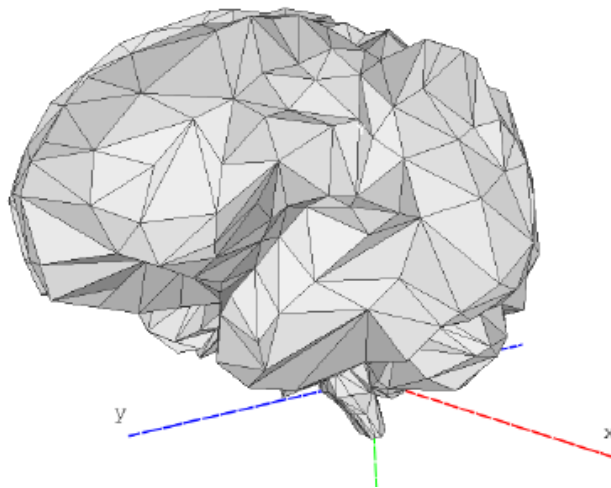
- Nubes de puntos
- Imágenes de Profundidad
- Sopa de Polígonos
- Malla de Polígonos

Cada herramienta para el análisis de los modelos 3D trabaja con una forma de representación diferente.

Posteriormente en el documento explican por qué se debe usar la malla de polígonos frente a otros tipos de representación.

3. Una de las primeras razones es porque permite el uso de herramientas en las cuales se aplican técnicas que incluyen el álgebra lineal.
4. Uno de los software utilizados para la comparación es el Princeton 3D Shape Benchmark (PSB) y este únicamente admite objetos 3D representados en malla de polígonos.

Dentro de la malla de polígonos destaca una representación llamada “Malla de Polígonos triangulares” y esta resulta siendo la más utilizada en el mercado para reconstruir o para representar modelos 3D, debido a que, siempre que se desplace el objeto con la “Malla de polígonos triangulares” estos mantendrán la misma posición en el mismo plano.



*Figura 63.* Una figura en 3D de un cerebro, representada mediante malla de polígonos triangulares. Tomado de: Sipiran Mendoza, I. A. (2014). Local features for shape matching and retrieval. Valle Chávez, A. (2016). Recuperación y comparación de figuras en 3D

### Control de invariantes en una figura 3D

Por lo general los modelos 3D, al estar representados en una base de datos tienen información en unidades acerca de la posición y de la orientación, ordenadas de forma arbitraria, por ello es necesario aplicar un control de Invariantes, con el objetivo principal de que las características intrínsecas del modelo no cambien.

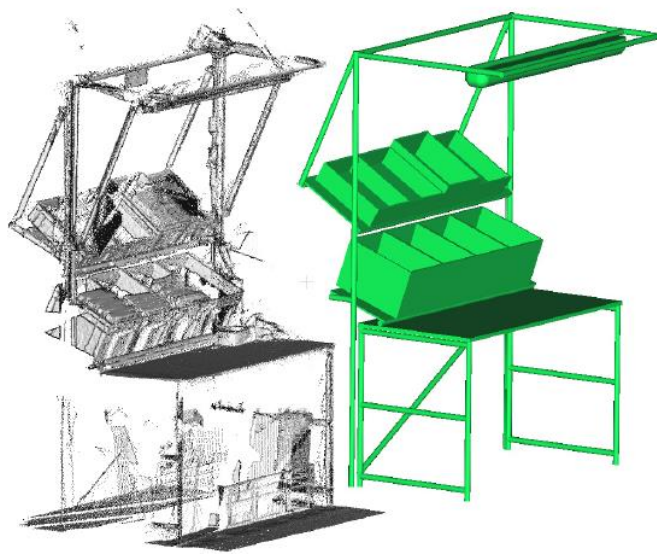
#### Invariante de rotación

La condición de rotación en un modelo 3D es un problema en comparación a las demás invariantes de escala (escala y traslación). Una de las herramientas para obtener la alineación en términos de rotación es la técnica de análisis del componente principal o PCA, que también es conocida como Transformada de Karhunen-Loeve o Transformada de Hotelling.



La PCA se utiliza para calcular como primera medida los ejes principales del modelo, de tal manera que el modelo se rota para que sus ejes principales se asociando con un sistema coordenado canónico. Ahora el siguiente paso es pasar de PCA a una base de datos 3D.

También en “*Comparison of 3D scanning and 3D modelling of a workplace from various aspects. In Industrial Engineering and Engineering Management*” al evaluar los dos métodos de preparación del modelo 3D, se pudo constatar algunas diferencias entre los dos modelos. Al medir el espacio de trabajo utilizando una herramienta común, sólo se captó la dimensión y la posición de las piezas necesarias. Cuando se utiliza el escáner 3D, todo el lugar de trabajo se ha capturado, como se ve en la Figura 60.



*Figura 64. Nube de puntos escaneada de un área de trabajo y su respectiva representación en 3D. Tomado de: “Comparison of 3D scanning and 3D modelling of a workplace from various aspects. In Industrial Engineering and Engineering Management”*

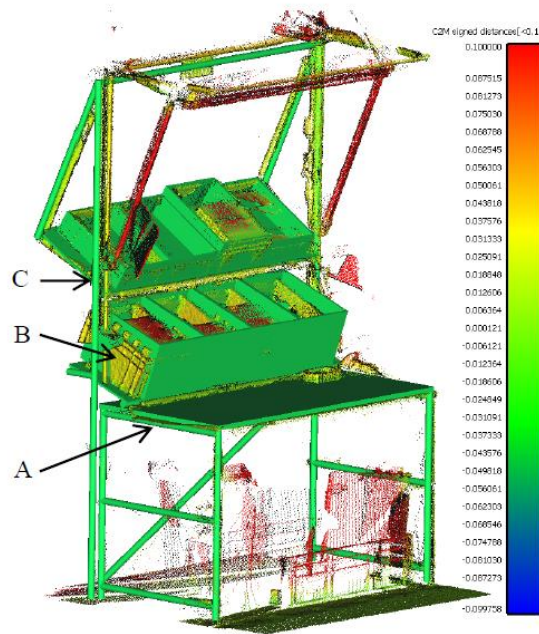
Las diferencias más importantes se hicieron visibles al intentar registrar el modelo con la nube de puntos. Aunque ambos fueron hechos por ingenieros experimentados, no se pudo hacer un registro preciso, ver Fig. 61. La figura muestra una captura de pantalla del software

de procesamiento de nubes de puntos de Cloud Compare<sup>30</sup>, con el modelo 3D sobre la nube de puntos, es decir hace una comparación de ambos modelos. Los colores de los puntos representan la distancia más cercana desde el punto hasta cualquier punto en las superficies del modelo.

En la figura se pueden evidenciar algunas diferencias que podrían influir en la precisión del análisis ergonómico. Por ejemplo, en el borde A de la figura 4, sólo se mide correctamente una esquina de la superficie de la mesa: la mesa está doblada en realidad, lo cual puede ser inesperado durante la medición convencional. Por lo tanto, este error puede ocurrir muy fácilmente. De igual manera se puede apreciar que las cajas están en diferentes lugares, a unos 5 centímetros a la izquierda en el caso de la nube de puntos escaneados. Esto se debe a que el escaneado y las mediciones se realizaron en diferentes momentos. La inclinación y altura de las cajas es importante y esto puede cambiar los resultados del análisis ergonómico muy significativamente. La altura del borde de las cajas en el estante superior es correcta, pero su inclinación no es correcta en C.

---

<sup>30</sup> Ver glosario



*Figura 65. Nube de puntos a malla, la distancia es medida en metros y comparada con el original. Tomada de: "Comparison of 3D scanning and 3D modelling of a workplace from various aspects. In Industrial Engineering and Engineering Management"*

En este caso, los errores podrían ser causados durante el escaneado o los escáneres 3D de medición pueden ser sensibles a las vibraciones del suelo, pero la amplitud de las vibraciones era mínima en ambos casos (no había máquinas pesadas ni dispositivo de transporte presentes en los pabellones de producción).

### **Hardware recomendado para el funcionamiento adecuado de PhotoScan,**

Configuración básica de 2 GB hasta 32 GB de RAM

**CPU:** cuatro núcleos Intel Core i7 CPU, Socket LGA 1150 o 1155 (Kaby Lake, Skylake, Broadwell, Haswell, Ivy Bridge o Puente de arena)

**BOARD:** Cualquier modelo LGA 1150 o 1155 con 4 ranuras DDR3 y al menos 1 ranura PCI Express x16

**RAM:** DDR3-1600, 4 x 4 GB (16 GB total) o 4 x 8 GB (32 en total GB)

**GPU:** Nvidia GeForce GTX 980 o GTX GeForce 1080 (opcional)

Una vez conocidos los requerimientos mínimos de máquina, se puede descargar la aplicación desde la página <http://www.agisoft.com/downloads/installer/> el programa se encuentra disponible tanto para Windows, I'Os y Linux. Una vez instalado el programa el usuario se se puede observar en la Figura xxx que PhotoScan Agisoft® contiene muchas herramientas que serán de ayuda en el avance de este trabajo.