



APLICACIÓN DE MÉTODOS DE VIRTUALIZACIÓN EN ARQUEOLOGÍA: EL CASO DE LA ESTELA A DE LA TUMBA DE HENENU (TT 313, DEIR EL-BAHARI, EGIPTO)

APPLICATION OF VIRTUALISATION METHODS IN ARCHAEOLOGY: THE CASE OF STELA A FROM THE TOMB OF HENENU (TT 313, DEIR EL-BAHARI, EGYPT)

Antonio J. Morales^{a,*} , Mario Ramírez Galán^a , Marina Camacho Galán^b , Flavio Celis
D'Amico^b , Ernesto Echeverría Valiente^b 

^a Departamento de Historia y Filosofía, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Alcalá, Trinidad 1, 28801, Alcalá de Henares, España. antonioj.morales@uah.es; mario.ramirezg@uah.es

^b Departamento de Arquitectura, Escuela de Arquitectura, Universidad de Alcalá, Sta. Úrsula 8, 28801, Alcalá de Henares, España. marina.camachog@edu.uah.es; flavio.celis@uah.es; ernesto.echeverria@uah.es

Highlights:

- La combinación de diversos métodos digitales para la reconstrucción virtual es una poderosa herramienta para la difusión y la investigación del patrimonio arqueológico.
- El trabajo con cientos de fragmentos hallados en la tumba de Henenu ha permitido la reconstrucción virtual de cuatro estelas funerarias, con especial detalle en el caso de la estela A.
- Las hipótesis, cálculos e interpretaciones derivadas de estas reconstrucciones virtuales han contribuido a identificar la posición inicial de estas estelas en el monumento.

Abstract:

This paper aims to demonstrate how the combination of digital methods for virtual reconstruction is valuable both for knowledge dissemination and for its application in research. Through the case study of the tomb of Henenu (TT 313: Deir el-Bahari, Luxor), this paper shows that the virtual reconstruction techniques constitute a very powerful tool to test hypotheses. Based on this objective, namely the testing of several hypotheses about the dimension and location of various tomb stelae, the authors explain the workflow used during the reconstructing process of these stelae found in the tomb of Henenu and suggest their originally intended setting within the tomb.

Hundreds of stela fragments were found by the New York Metropolitan Museum of Art archaeological expedition between 1922 and 1923. Upon these discoveries, archaeologists decided to reconstruct four stelae, emphasising stela A, whose quality attests for its relevant position in the monument. William Hayes identified four different stelae on the basis of the rock types, the stela fragments thickness, the edge types (curve-edged vs. flat-edged), as well as the iconographic and inscriptional materials attested through the fragments. In 2015, the Middle Kingdom Theban Project (MKTP) continued with the previous works in the area and initiated the recovery of hundreds of fragments from the tomb of Henenu, some of them previously unattested. Once the archaeological and architectural data were collected, the MKTP specialists proceeded to calculate and reconstruct the four stela dimensions through digital means. In addition, the researchers tested whether these four stelae fit the rock-cut niches identified for their original location. All of them were located in the tomb main corridor leading to the public cultic area within the rock-cut tomb. The following pages describe the workflow used in this process, expanding from the tomb cleaning and laser scanning to digital documentation and modelling. For this project, the architects of the team used the laser scanner Faro Focus 3D to document Henenu's tomb, including the corridor leading to its cultic chamber, as well as the tomb restricted (sacred) areas (i.e., burial chambers and shafts). The data obtained was subsequently processed in Leica Cyclone to obtain a mesh. However, the resulting mesh was not sufficiently clean as it presented some noise. Noise consists of anomalies generated during the scanning process, and it is critical to achieve the most accurate result. The cleaning process was carried out in different software. The outcome was then imported into the Blender modelling software. This result enabled the researchers to create a virtual model of Henenu's stela A, which was then textured using the Substance Painter software. For this procedure, specialists searched for ancient Egyptian limestone stela examples with similar textures. In the final phase, Photoshop and Substance Painter were combined, which was key for reproducing the details of the inscription carved in the stela A. The stela major topic is the provision of offerings to the deceased and the guarantee of benefactions for the deceased; this explains why the presumable niche for this object was just at the entrance of the tomb.

* Corresponding author: Antonio J. Morales, antonioj.morales@uah.es



The ancient Egyptian findings reconstruction is an essential part of the archaeological, epigraphic, and conservation initiatives conducted by the MKTP in the cemeteries of Deir el-Bahari and Asasif (Luxor, Egypt). This multidisciplinary international project seeks to continue with the excavation, documentation, and publication of the archaeological, artistic, and material finds dating to the Eleventh and Twelfth dynasties in the Theban necropolis. Thanks to the virtual reconstruction and to the study of the related data, scholars were able to choose one of the initial reconstruction and location hypotheses of these stelae, providing an answer to the initial question of the project, particularly in the case of stela A.

Keywords: Egyptology; Middle Kingdom Theban Project (MKTP); virtual archaeology; laser scanning; 3D modelling; Thebes

Resumen:

Este trabajo pretende demostrar cómo la combinación de métodos digitales para la reconstrucción virtual en arqueología es mucho más que una simple herramienta para la difusión del patrimonio. A través del estudio de la tumba de Henenu (TT 313: Deir el-Bahari, Luxor), este artículo demuestra que los métodos de reconstrucción virtual constituyen una herramienta eficaz para examinar diversas hipótesis. Cientos de fragmentos de estelas fueron encontrados por la expedición del Museo Metropolitano (Nueva York) en 1922-1923. Tras este descubrimiento, los arqueólogos reconstruyeron cuatro estelas, destacando la estela A. Una vez recuperados los datos arqueológicos y arquitectónicos, los especialistas del MKTP procedieron a reconstruir las posibles dimensiones de estas estelas mediante técnicas digitales. Además, se examinó si las estelas encajaban en los nichos originales construidos para este propósito. En este artículo se plantea el flujo de trabajo empleado desde el escaneado láser hasta el modelado de las estelas, usando un escáner láser para documentar la tumba. Los datos fueron procesados con Leica Cyclone para obtener una malla, aunque la malla presentaba algo de "ruido", anomalía que debió ser corregida con otro software. El resultado fue entonces exportado a Blender. De este modo se consiguió la reconstrucción virtual de la estela A de Henenu, que recibió texturas y otros rasgos con Substance Painter y Photoshop. El tema principal de la estela es la provisión de ofrendas y la garantía de beneficios para el difunto, lo que explicaría que el nicho de erección de la estela estuviera a la entrada de la tumba. Como se describe en las conclusiones, gracias a la aplicación de las técnicas de reconstrucción virtual y a los cálculos derivados de la misma, se ha podido elegir una de las hipótesis de reconstrucción y localización de las estelas, ofreciendo una respuesta a la pregunta inicial que se planteaba sobre el caso de la estela A.

Palabras clave: egiptología; Middle Kingdom Theban Project (MKTP); arqueología virtual; láser escáner; modelado 3D; Tebas

1. Introducción: el complejo funerario de Henenu y sus estelas

Desde 2015, la expedición arqueológica de la Universidad de Alcalá (UAH) y su equipo *Middle Kingdom Theban Project* (MKTP) han venido desarrollando campañas anuales de trabajo de campo e investigación en las necrópolis tebanas de Deir el-Bahari y Asasif (Luxor, Egipto).¹ Los monumentos de estas dos necrópolis (Fig. 1) datan de finales de la dinastía XI y comienzos de la dinastía XII (ca. 2050–1950 a.n.e.), un periodo de transformaciones políticas, sociales y culturales muy relevante para la reconstrucción de la historia del Egipto faraónico. Aunque se distinguen varias tipologías arquitectónicas en estos cementerios, en general los complejos funerarios de estos oficiales de alto rango presentan una parte pública – accesible y destinada a la visita de familiares, conocidos y oficiantes ritualistas– y una parte privada –íntima e inaccesible– donde reposaba el cuerpo del difunto (Echeverría et al., 2018; Echeverría et al., 2019). La parte pública solía incluir un patio externo frente a la tumba, una fachada (tallada plana o con pilares, llamada *saff*) y un hipogeo cavado en la roca que albergaba un pasillo, nichos subsidiarios y una sala pública de culto, normalmente con una estatua o representación del difunto. La parte privada – al contrario que la pública, que era accesible y quedaba

expuesta a todo riesgo– estaba protegida y escondida, y contaba con un pasillo descendiente y la cámara sepulcral destinada a albergar el sarcófago o ataúd, el cadáver del difunto (momia) y su ajuar funerario. En el presente artículo, el foco de atención recae en el pasillo principal de uno de los hipogeos del proyecto. Como en otras tumbas de la época, esta sección pública del monumento estaba tallada en la roca y forrada de bloques de piedra con o sin decoración –a menudo con arenisca para el suelo y caliza para las paredes– mientras que en otras tumbas más humildes las paredes se cubrían de mortero y yeso para dotarlas de un color blanco o amarillento e incluso, en algunos casos, pintar escenas de vivos colores.

El estudio de caso en el presente trabajo se centra, por lo tanto, en el pasillo principal de la tumba del intendente real Henenu (Fig. S1), cuyo monumento funerario –denominado Tumba Tebana 313, TT 313 o, anteriormente, MMA 510²– ha sido estudiado por varios equipos, destacando las excavaciones en los años 20 de la expedición tebana del Museo Metropolitano de Arte de Nueva York y los trabajos más recientes del MKTP, equipo al que pertenecen los autores del presente estudio (Winlock, 1947: 33–34, 44, 67; Soliman, 2009: 112–114; Morales et al., 2016: 281, fig. 9; Morales et al., 2017: 155–156; Morales et al., 2018: 189; Morales et al., 2022).

¹ Con la autorización del Ministerio Egipcio de Turismo y Antigüedades (MoTA), en la actualidad la concesión de la Universidad de Alcalá y el MKTP está constituida por los complejos funerarios de Henenu (TT 313) e Ipi (TT 315), así como la tumba E1 (MMA 521) en el cementerio norte en Deir el-Bahari, y los complejos funerarios de Dagi (TT 103) y Djari (TT 366) en la planicie sur de Asasif. Ambas necrópolis están situadas en la orilla occidental de Luxor, antigua Tebas.

² La identificación de tumbas tebanas es tema de gran debate en la actualidad puesto que se han venido empleando diversos sistemas que en ocasiones han llevado a confusión: la nomenclatura del MMA fue usada inicialmente por la expedición del museo, dirigida por Herbert Winlock, mientras que la lista de tumbas tebanas (TT) fue implementada por el Servicio de Antigüedades Egipcio y publicada por primera vez en Gardiner y Weigall, 1913, con materiales adicionales en Engelbach, 1924; Bruyère, Davies y Davies, 1925; y Fakhry, 1947.

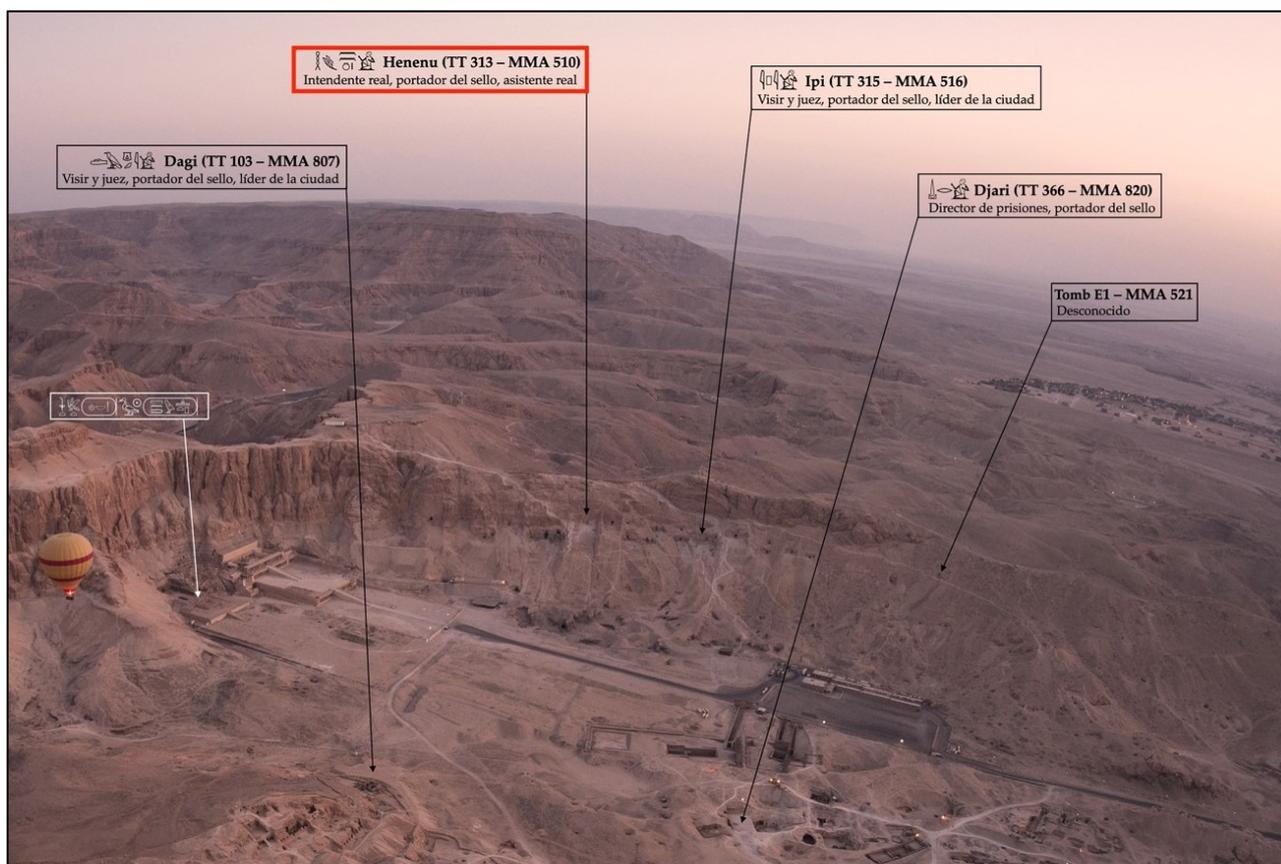


Figure 1: Localización de las tumbas datadas en el Reino Medio de la concesión de la Universidad de Alcalá (UAH) con el complejo de Henenu (TT 313) marcado en rojo.

El pasillo de la tumba de Henenu se extiende unos 12 m aproximadamente desde la entrada hasta la sala de culto pública (véase Supplementary File, Fig. S1: Hall_3). Originalmente, el suelo de esta tumba estaba recubierto de lajas de piedra arenisca y las paredes presentaban un revestimiento de bloques de caliza que debieron otorgar majestuosidad al acceso de la tumba. Además, cuatro estelas –colocadas por pares enfrentadas– parecen haber sido erigidas a lo largo del pasillo (Hayes 1949), representando al difunto en pose sentada y recibiendo ofrendas por parte de los visitantes; un dato significativo, además, es que estas estelas incluían referencias a los títulos administrativos y nobiliarios del difunto, así como a algunos de los eventos más importantes de su vida. Sin duda alguna, este tipo de objetos funerarios aportan un cúmulo importante de información sobre la vida de sus dueños y son empleadas en el análisis de sus carreras profesionales (Arnold, 1991; Allen, 1996). La reconstrucción de estas estelas no supone un trabajo sencillo: primero la expedición norteamericana del Museo Metropolitano de Arte de Nueva York (MMA) y luego los trabajos del MKTP han permitido recuperar cientos de fragmentos de estas estelas; desgraciadamente, éstas debieron ser destruidas en algún momento de la historia de la tumba –quizás cuando los bloques pétreos de los muros y suelos fueron saqueados– y solo nos han llegado pequeños fragmentos de las mismas. Con estos restos, el equipo epigráfico inició un trabajo de identificación manual de las estelas –distinguiendo objetos en base a su material, color, ancho de la pieza, tipo de técnica de tallado de los

jeroglíficos, categorías de los pigmentos, contenido de los textos o escenas, etc.– que ha dado buenos resultados (Gracia Zamacona, 2019). A posteriori, este procedimiento se ha combinado con el escaneo de estos fragmentos de objetos de pequeño tamaño (Morales *et al.*, 2022). Estos trabajos permiten que los epigrafistas puedan ir resolviendo cuatro puzzles –pues se confirma la presencia de fragmentos derivados de dos parejas de estelas– con las dificultades materiales, iconográficas y textuales que la propia naturaleza del trabajo epigráfico implica (cf. Lori & Rossi, 2020).

Sin embargo, la multidisciplinariedad del proyecto MKTP también permite al equipo plantearse cuestiones sobre el contexto de las estelas y los nichos o espacios en los que las mismas fueron erigidas o fijadas.³ Ello ha llevado a la combinación de esfuerzos entre arquitectos, epigrafistas y especialistas en arqueología digital, cuyos cálculos y reconstrucciones conforman una nueva herramienta de gran capacidad en la investigación arqueológica del proyecto (cf. Lucarelli & Johnston, 2022; Serrano Lara, 2021). Los trabajos de escaneo láser de la tumba, la obtención de datos mediante la fotogrametría, la reconstrucción manual y digital de las estelas y los espacios arquitectónicos que una vez las albergaron contribuyen al estudio del patrimonio egipcio en general y, en este caso, a la reconstrucción del interior del monumento de Henenu y sus cuatro estelas en particular. Este artículo se centra, sobre todo, en la estela A, una de las más relevantes para el trabajo del proyecto.

³ No se deben confundir los nichos u hornacinas de poca profundidad que se discuten en este trabajo con los nichos subsidiarios construidos como parte del proceso de reutilización

de la tumba, que servían para albergar otros enterramientos: véanse los nichos Nich_1, Nich_2, Nich_3 y Nich_4 en la Fig. S1 para el pasillo en cuestión.

2. Métodos

2.1. La producción de la nube de puntos

La primera etapa metodológica consiste en el trabajo sistemático de escaneado para la generación y unión de nubes de puntos del complejo funerario de Henenu (TT 313), obteniendo un modelo tridimensional (3D) digital de su estado y morfología actuales. Se han utilizado para ello una suma de 59 escaneos comprendiendo toda el área de excavación recogidos durante la expedición arqueológica de la UAH a Deir el-Bahari, en la primavera del año 2017 (Morales et al., 2017; Morales et al., 2018). Como control auxiliar de posibles deformaciones del modelo 3D –debido al enlace de nubes– se emplean métodos topográficos para la asignación de medición de distancias entre puntos de apoyo (i.e., elementos singulares de la propia galería), empleando técnicas de medición sin prisma; ello ha permitido sustituir las clásicas dianas o jalones para no distorsionar visualmente el modelo virtual. Tampoco se han empleado clavos o marcas de pintura por tratarse de una estructura monumental de 4000 años de antigüedad. Los puntos singulares de la estructura de la galería excavada se han distribuido a diferentes alturas y profundidades, de forma que abarquen varios escaneos cada uno de los vectores de control. Los resultados de las mediciones se corrigen por los efectos de presión, humedad y temperatura, y se han pasado por un filtro estadístico para determinar su valor real. El filtro estadístico consistió en realizar varias medidas de cada posición y producir una media ponderada, eliminando los dos extremos. De esta forma, se ha podido comprobar durante la ejecución del trabajo que las medidas resultantes de la unión de todas las nubes de puntos no han diferido más de 9 mm respecto a las medidas reales de control tomadas in situ, tanto en planta como en altura. Es evidente, como creemos que también demuestra este estudio de caso, que el levantamiento arquitectónico por medios digitales es una de las herramientas gráficas más potentes disponibles en el momento para la catalogación, documentación, difusión e investigación del patrimonio.

El uso de este tipo de tecnología está ampliamente contrastado en todo tipo de construcciones, tanto de carácter arquitectónico (e.g., Moreno & Echeverría, 2019) como arqueológico (e.g., Wittur, 2013; Olmo et al., 2012). Su utilización confiere unos altos niveles de precisión métrica, disminuye los márgenes de error con respecto a los levantamientos manuales y permite posteriores operaciones de modelado y de tratamiento digital de la documentación obtenida. Dentro de los levantamientos digitales, la aparición de los escáneres 3D se ha convertido en el sistema más versátil de recolección de datos (Navarro et al., 2011). En estos años, varias generaciones de equipos se han sucedido, haciendo que el proceso sea más preciso y rápido y reduciendo su precio, peso y tamaño. También ha mejorado el software de apoyo y su versatilidad. Aunque arquitectos y arqueólogos a menudo siguen haciendo uso de las herramientas tradicionales, la precisión y velocidad del escaneo láser han llevado a que se extienda ampliamente su uso.

En el caso de la documentación gráfica aplicada a la arqueología y epigrafía funeraria egipcia, la utilización de los escáneres 3D (modelo Faro 120 / Focus 3D; resolución 1/6, calidad 4x) tiene algunas ventajas añadidas. Se trata de espacios interiores, excavados en

roca, con una geometría no lineal, con muchas irregularidades tanto en el trazado general como en las superficies excavadas. La utilización del escáner 3D permite captar todas estas irregularidades de manera rápida y precisa, si bien es necesaria una sucesión de posicionamientos muy cercanos para poder enlazar todas estas superficies complejas. La limitada ventana de tiempo de las expediciones requiere además herramientas rápidas de toma de datos, ya que el posterior procesamiento digital de los datos recogidos puede hacerse en el laboratorio en la institución de origen. En los últimos años varias expediciones han utilizado estas técnicas para documentar conjuntos funerarios en Egipto (e.g., Bryson, 2020; Manuelian, 2020; Mozas-Calvache et al., 2020). En el marco de la expedición de la UAH y el proyecto MKTP, esta técnica ya ha sido aplicada de modo exitoso en la documentación de la tumba de Ipi en Deir-El-Bahari (Morales et al., 2019) y del mismo Henenu (Morales et al., 2018).

Para la documentación gráfica de la tumba de Henenu se utilizó un equipo FARO Focus 3D; el post-procesado de datos se llevó a cabo con los softwares Faro SCENE v. 6.0 y Leica Cyclone v. 2021.1.r20092. Se ha empleado una configuración 4x de 8µ por punto de escaneo. Antes de usar el escáner, es necesario hacer un estudio previo de las zonas de sombras provocadas por cada posición de la máquina para evitarlas mediante puntos extra de tomas de datos, buscando un equilibrio entre la mejor imagen y el número óptimo de posicionamientos. Los puntos a tener en cuenta serán la rugosidad de la roca, los cambios de dirección de su geometría y posibles usuarios del monumento. En la planificación de los emplazamientos del escáner también es importante tener en cuenta las irregularidades del suelo y la colocación de la iluminación artificial de los espacios, que afectan a la calidad de la imagen fotográfica (no así a la resolución geométrica). Los emplazamientos en túneles y galerías secundarias de esta tumba han sido particularmente complejos ya que su tamaño reducido dificultaba el acceso del operador y requería de numerosos puntos de enlace por los fuertes ángulos de giro de su geometría.

Para el trabajo con la nube de puntos, por lo tanto, se han utilizado los escaneos citados con anterioridad en la expedición arqueológica a Deir el-Bahari en su tercera campaña (Morales et al., 2017: 187–189). Inicialmente, se nos proporcionaron los croquis originales de gestión y recopilación de los escaneos que se tomaron in situ durante la campaña y con dicha información se pudo comenzar a trabajar observando la morfología aproximada de la tumba y la posición donde habían sido tomados los escaneos. Todo este proceso de digitalización y tratamiento de datos se ha realizado con el software de registro de nubes de puntos y escaneo láser 3D, Leica Cyclone REGISTER 360.

Como resultado del trabajo realizado anteriormente, se produce un documento llamado TT313_HENENU en el que se van a importar un total de 59 escaneos láser en formato .fls. Estos escaneos, que comportan tanto la parte interior de la tumba como la entrada desde el exterior, se colocan en el *sitemap* de la interfaz y se van uniendo uno a uno de forma manual para conseguir el mayor grado de solapamiento y optimización. Para ello se van seleccionando nubes de estacionamiento de dos en dos y mediante la opción de alineación visual se van solapando, tanto en planta como en sección, modificando la orientación e inclinación. De cada enlace creado, el programa indica el porcentaje de solape (solape medio:

60%), lo que nos ayuda a crear uniones lo más precisas posibles. Es necesario remarcar que es fundamental que los escaneos presenten un número suficiente de puntos homólogos, ya que la falta de estos puntos debilita drásticamente la unión. Con todo ello, se ha observado que en los puntos de mayor distancia entre escaneos los enlaces son menos estables. Un ejemplo de ello son los pozos 1 y 2, que se sitúan a unos 6 m de profundidad del corredor horizontal de la tumba (Fig. S2). La imposibilidad de colocar el escáner a una cota intermedia entre el punto más alto y el más bajo hace que exista solo un porcentaje de solape del 9% entre estos, de ahí que el software marque en rojo este enlace particular, indicando que no es óptimo.

A pesar de estos pequeños márgenes de error en el solape, el conjunto general de escaneos se ha unido con éxito según el informe generado por Cyclone 360, que aporta los datos ofrecidos en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros sobre los enlaces establecidos entre nubes de estacionamiento en Cyclone 360.

Número de estacionamientos	59
Número de enlaces	115
Fuerza	67%
Solapamiento	60%
Error de conjunto	0.005 m

Como se puede apreciar, se registran y enlazan los escaneos que constituyen la base, con los 115 enlaces necesarios para su unión. Esto indica que los escaneos más cercanos poseen una fuerza de triangulación óptima. El modelo de puntos presenta un error de conjunto total de 0.005 m, dato óptimo según los baremos del propio programa, que marca un error máximo de 0.015 m como error máximo asumible. El “error máximo asumible” se refiere a la tolerancia o margen de error que el programa permite antes de considerar que el modelo es inaceptable; está basado en comparación con puntos de control conocidos (i.e. 9 puntos de control a lo largo de la galería), algoritmos de ajuste y métodos de validación internos del programa.

Una vez que la nube de conjunto está optimizada y preparada para trabajar (Fig. S3) se utiliza Cyclone 360 para la exportación de las ortofotos de nubes de las secciones correspondientes al corredor donde se encontraban las estelas. Lo relevante aquí es que mediante las ortofotos (i.e. ortofotos de nubes, así como ortofotos) se puede disponer de un documento a escala real que se puede manipular en programas de edición gráfica (por ejemplo, AutoCAD – r2020 de AUTODESK) y que nos permiten medir distancias entre puntos para hacernos una idea lo más fidedigna posible de la morfología real en la actualidad, para con ello corroborar posibles hipótesis que se hayan hecho de los estados antiguo y moderno de la tumba.

Una vez finalizada la primera etapa de trabajo con Cyclone 360, se comienza a trabajar con Cyclone 3DR v. 3.6. Cyclone 3DR fusiona la tecnología *JetStream* para la gestión centralizada de nubes de puntos a gran escala, con el análisis y diseño automatizado de nubes de puntos en un software basado en flujos de trabajo con herramientas personalizadas para los campos de topografía, construcción e inspección. Gracias a sus numerosas herramientas, nos ha permitido la limpieza exhaustiva de

ruido en la nube de puntos original, dando una orientación correcta al conjunto y acotando el área de trabajo destinado a la reconstrucción que realizaremos a posteriori.

Para iniciar el trabajo con Cyclone 3DR, en primer lugar se importó el archivo en formato .lgs correspondiente a la nube de puntos que habíamos extraído. Al importar el archivo, el software nos permitió abrir en la interfaz tanto la nube de puntos –perfectamente unidos y optimizados– como sus correspondientes imágenes asociadas. A continuación, fue necesario realizar todo un proceso de limpieza de la nube, por lo que se fueron separando de forma manual todos aquellos grupos de puntos que no pertenecían a la morfología original de la tumba. Gracias a las numerosas herramientas de Cyclone, decidimos realizar una selección manual de los puntos. Esto se debe a que tanto la detección automática de ruido como la separación de puntos entre suelo, paredes y otros puede llegar a confundir al programa, pues estamos tratando un espacio que poco se relaciona con la geometría de estos elementos arquitectónicos tradicionales. La limpieza manual es, sin duda, la parte más laboriosa del proceso, y presenta ciertas dificultades: por ejemplo, la limpieza de cables u objetos pequeños que se encontraban en el suelo a la hora de hacer el escaneado están muy mimetizados con la superficie y conllevan un proceso particularmente concienzudo.

Al tratarse el pasillo principal de la tumba de un espacio tan angosto, se estableció que la mejor visualización de la reconstrucción de las estelas es a modo de sección longitudinal (Figs. S4 y S5). De esta manera, y con la nube de puntos ya limpia, se procedió a dividir la tumba en dos mitades (oeste y este) donde se muestran los supuestos nichos originales de las estelas A/C (mitad oeste) y B/D (mitad este).

2.2. Generación y exportación de las mallas

La segunda parte de flujo de trabajo abarca la conversión de la nube de puntos en una malla 3D. Este proceso se realiza en Cyclone 3DR mediante la opción de mallado en dos pasos. En cuanto a los parámetros de mallado, se ha establecido una distancia promedio entre puntos de 0.13 m y una detección de orificios de 0.37 m para el tamaño del triángulo. Dichos parámetros siempre van a depender de la cantidad de detalle que se necesite, así como de la dimensión del propio modelo (Tabla 2). Una vez que se consigue una primera visualización de esta malla, es necesario entonces refinarla estableciendo una serie de parámetros, los cuales pueden variar –del mismo modo– dependiendo de las necesidades de cada modelo.

Una vez que se han generado correctamente las dos mallas por separado, éstas se colorean desde la información del color real de la nube de puntos. De esta manera se ha podido exportar las dos mallas en formato .obj con sus texturas correspondientes, uno de cuyos ejemplos se puede observar en la Fig. 2.

Tabla 2: Tabla de parámetros para generar y refinar las mallas en Cyclone 3DR.

Error de desviación	0.001 m
Número máximo de triángulos	304400
Tamaño mínimo del triángulo	0.007 m
Distancia	0.13 m
Reorganización local	Sí



Figure 2: Malla coloreada 1 – perteneciente a la sección oeste de la tumba con estelas A y C.

La tercera y última fase de la metodología propuesta consiste en la reconstrucción y texturizado digital de un modelo 3D de la estela A procedente del pasillo principal de la tumba-hipogeo de Henenu, con el objetivo de analizar tanto sus aspectos estructurales como la disposición de la misma y de las otras tres estelas (B, C y D) que se plantean para los espacios del pasillo principal.

Para proceder al modelado de la estela A de Henenu, fue necesario un exhaustivo estudio de los trabajos epigráficos previos con el objetivo de extraer toda la información referente a las dimensiones, tipo de material, posible decoración, características de la inscripción y localización de la estela dentro de la tumba. Por un lado, se examinaron las reconstrucciones y detalles ofrecidos por la expedición inicial de 1922-1923 (i.e. dirigida por Herbert Winlock, del MMA: Winlock, 1947: 44–45; Winlock, 1942: 68) que descubrió los primeros fragmentos, así como por el investigador del museo que estudió estos restos unos años después (Hayes, 1949). Por otro lado, en los últimos cinco años (2018-2023) el equipo MKTP ha desarrollado una labor arqueológica de limpieza y estudio del interior del hipogeo así como la excavación de la parte superior del patio del complejo de Henenu; de esas excavaciones han surgido otros cientos de fragmentos que sirven para continuar con el trabajo de reconstrucción de estas estelas, incluida la estela A (Pedersen & Gracia Zamacona, 2022; Gracia Zamacona, 2019; Morales et al., 2017).

De esta estela se han recuperado unos 35 fragmentos, los cuales dan forma a una lápida de caliza de 101.2 x 157x 22 cm aproximadamente con una forma rectangular oblonga, la cual se encontraba situada –considerando total la evidencia– en un nicho de poca profundidad cavado en la roca a pocos metros de la entrada, en la pared oeste del umbral de la tumba (Fig. 3).

En origen, la estela A parece haber estado apoyada sobre una losa de piedra arenisca, a una altura de 73 cm y con unas dimensiones de 218 x 46 x 22 cm (véase estela A a la entrada del pasillo del hipogeo, Fig. 3). Es importante destacar que, en el momento del hallazgo, dicha losa fue encontrada en su posición original

(Hayes, 1949: 43–44). Junto con la estela A –y según la descripción ofrecida en Winlock, s.f.: 151– existieron tres piezas más (denominadas estelas B, C y D). La identificación de su localización se basa en las hornacinas o nichos excavados a ambos lados del pasillo, siendo en principio su posición meramente especulativa (véanse estelas B, C y D en la Fig. 3). Estos huecos pudieron ser rellenados con algún tipo de mortero para albergar cada una de las estelas. Desde el punto de vista epigráfico, la identificación de las estelas se realizó gracias a la diferencia de los bordes de las piezas laterales de estas estelas. De este modo, fue considerado que aquellas piezas que presentaban un borde biselado pertenecerían a las estelas B, C y D, mientras que los bordes rectos habrían pertenecido a la estela A (Pedersen & Gracia Zamacona, 2022; Gracia Zamacona, 2019; Hayes, 1949). Además, se usó como criterio de distinción el tipo de material con el que se realizó cada estela, aunque la estela A parece ser la que presenta una mayor calidad en su composición caliza (Winlock, s.f.: 152).

2.3. Optimización de la tumba TT313

El modelo 3D generado en Cyclone 3DR se exportó en formato .obj para posteriormente ser importado en Blender con el objetivo de llevar a cabo la restitución de la estela en su supuesta localización y concluir, de este modo, si la información aportada en los trabajos previos era correcta. Una vez que llevamos la tumba al espacio virtual, se corroboró un dato que había sido evidente a los autores hasta el momento: la complejidad de la malla misma, que estaba formada por 4098853 caras, exactamente. Esto la convertía en una representación muy difícil de manejar para el ordenador, lo que suponía un problema relevante para el equipo. Para solucionarlo, se llevó a cabo un proceso de simplificación de la malla que se conoce como “retopología”. Dicho método consiste en la clonación del objeto de alta poligonación (*‘high poly’*, HP) en una primera etapa y en la reducción posterior del número de polígonos de la malla, manteniendo los detalles originales.

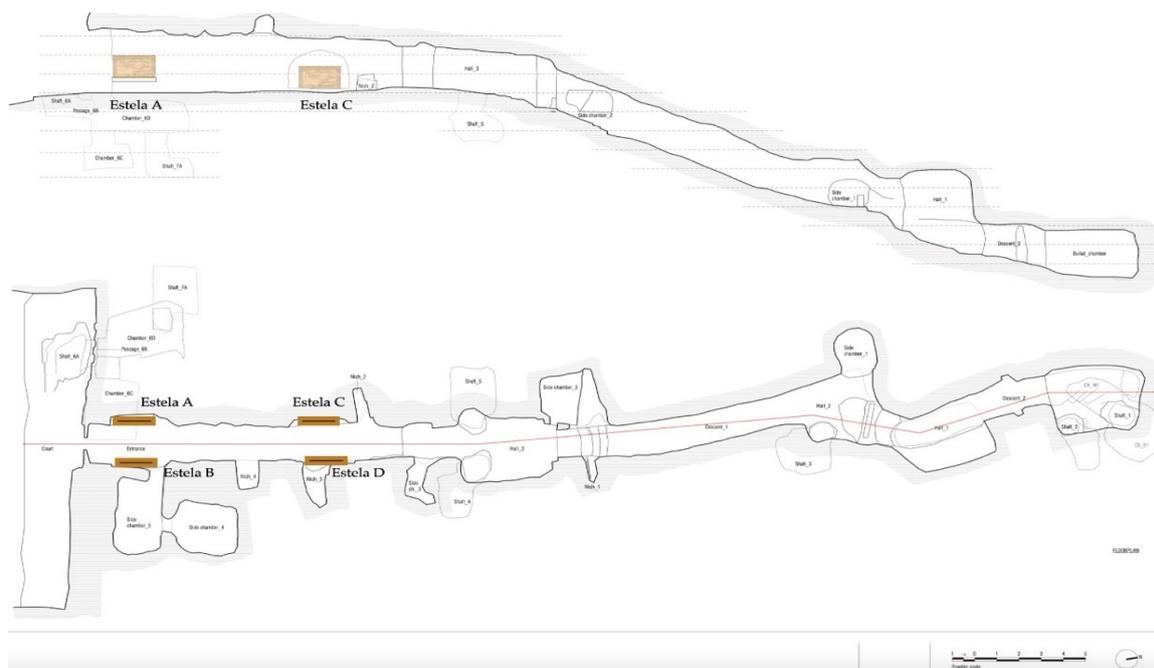


Figure 3: Localización aproximada de las cuatro estelas erigidas en el pasillo principal de la tumba de Henenu.

Además, se debe mencionar que antes de clonar el *asset* fue necesario realizar una segunda limpieza de la malla de manera manual porque la que lleva a cabo en *Cyclone* era automática e implicaba cierto riesgo a la hora de mantener elementos arqueológicos que el programa podría llegar a interpretar como ruido. Durante este limpiado, se cerraron huecos, se corrigieron errores en la malla y eliminó parte de la misma, ya que no presentaba una posición acorde con la realidad. Una vez mejorada, se duplicó el modelo 3D, al cual llamamos TT313_LP (las siglas LP hacen referencia a *Low Poly* o Bajos Polígonos). Este nuevo objeto se exportó para transferirlo a un software enfocado en exclusividad en retopología llamado *Instant Meshes*. Con la aplicación de este software se pudo reducir el número de polígonos, aproximadamente a un 10% del original (ca. 400.000 polígonos).

Este nuevo *asset* fue importado del mismo modo a *Blender*, donde se hizo el “bakeado”, técnica que consiste en la obtención del detalle de la superficie del modelo original y de las texturas. Una vez finalizado el proceso, el equipo contaba con un objeto 3D de baja poligonización que nos facilitaba realizar las correspondientes modificaciones para la restitución de las estelas. En este caso, se decidió proceder inicialmente con la restitución y modelado de la estela A de Henenu, quizás la más conocida por el número de fragmentos y la que debió estar situada en un nicho del muro oeste a la entrada de la tumba.

2.4. Modelado de la estela

A la hora de llevar a cabo la reconstrucción virtual de la estela A se empleó el software de modelado *Blender 3.0*. De este modo, se diseñó la estela en base a las dimensiones anteriormente mencionadas (Fig. S6), partiendo de la figura geométrica más similar que nos facilitaba el programa: un cubo. El proceso consistió en modificar la malla mediante el escalado de los tres ejes (x, y, z) con los valores facilitados por Hayes en su publicación de 1949.

Posteriormente, se procedió a aplicar cierto biselado a sus bordes porque, aunque parecen haber sido descritos como rectos, no pudieron serlo por completo y debieron presentar cierta angulación, aunque fuese menor que las atestiguadas para el resto de las estelas. A continuación, se procedió a realizar el mapeado UV de la pieza. El mapeado consiste en indicar cómo se debe establecer la textura sobre el objeto en el momento de proyectarse. Finalmente, se exportó el modelo en formato .obj, puesto que lo que realmente interesaba al equipo era obtener la malla para poder texturizarla en el software de texturizado (cf. Moyano et al., 2020).

2.5. Texturizado digital

La siguiente etapa consistió en la creación de un material lo más similar posible al que debió ser utilizado en origen por los artesanos del taller de estelas correspondiente. Para ello, se buscaron referencias para observar los rasgos distintivos de las calizas y poder duplicarlos para dotar de mayor veracidad a la estela (Fig. S7). A posteriori, se empleó el programa *Substance Painter v. 8.3*, que es un software de texturizado digital, de carácter no destructivo, cuyo flujo de trabajo se basa en la combinación de varias capas. Esto quiere decir que, si se localiza algún error o se quiere modificar algún aspecto, no será necesario empezar desde cero. En este proceso, los materiales se encuentran divididos en varios mapas, los cuales aportan una serie de características al modelo tras su aplicación sobre éste. En nuestro caso, trabajamos para la creación de los siguientes mapas: *diffuse*, *roughness*, *normals*, *ambient occlusion* y *height*.

El primero de los mapas es el utilizado para crear el color base de nuestro modelo. El segundo de ellos sirve para indicar las zonas que tienen más o menos rugosidad en la superficie del modelo; por lo tanto, este mapa sirve para determinar también cómo la luz se dispersa sobre la estela. Las zonas más rugosas dispersan la luz en más direcciones que las superficies pulidas. Los valores de *roughness* van desde 0.0 a 1.0. Si el valor es 0, el modelo no dispersará luz, mientras que si es 1 ocurrirá todo lo contrario; las normales darán a la textura profundidad,

simulando la forma en la que la luz interactúa con la superficie y obteniendo, como resultado, el relieve. En cuanto al mapa de *ambient occlusion*, aporta sombras a las zonas ocluidas del objeto en cuestión; finalmente, tenemos el *height* que es similar al de normales, con la salvedad que añade datos a la malla 3D.

Para la obtención de un material lo más exacto posible, se optó por el empleo de un compuesto de caliza procedente de librería,⁴ para posteriormente añadir diversas capas carentes en él. En este caso se pretendía encontrar el modo de mostrar cierto deterioro de la estela como consecuencia del paso del tiempo. Para alcanzar el resultado deseado se jugó con diversas capas procedurales que facilitaba SP. Junto a ello, se añadió suciedad al resto arqueológico, utilizando varias de las herramientas del programa: capas procedurales, pincel de suciedad y el generador *dirt*. A pesar de la importancia del aspecto, la inscripción de la estela era el eje vertebrador de esta fase del trabajo porque era lo que iba a dar una mayor carga científica a esta etapa del flujo de trabajo.

El proceso de creación del relieve se llevó a cabo, en primer lugar, en Photoshop, donde se unieron las cuatro ilustraciones que aportaba Hayes en su trabajo (Hayes, 1949: 45–48). Posteriormente, se invirtieron los colores con el objetivo de crear un canal *alpha*. De este modo, todo el relieve tendría un color blanco que en Substance Painter se convertiría en el relieve al usarlo dentro del canal *height*.

3. Resultados obtenidos del proceso

De la primera parte del flujo de trabajo, tras el modelado de la nube de puntos, se han podido extraer las ortofotos y secciones reales correspondientes al estado actual del pasillo y los nichos. Dichos documentos se han exportado en un formato de CAD y presentan las dimensiones reales del modelo, lo cual lo convierte en una herramienta útil para la toma de medidas. Esto puede llegar a ser muy útil a la hora de plantear diversas hipótesis interpretativas sobre las posibles diferencias entre los planos originales de la tumba y las medidas reales en la actualidad. En ese sentido, otros proyectos en Egipto han usado igualmente estos métodos –con escáner láser o mediante fotogrametría– para la reconstrucción de espacios funerarios, culturales o domésticos, con resultados muy positivos (e.g., Sykora et al., 2023).

Tabla 3: Dimensiones de las estelas A–D en base a los cálculos de la reconstrucción virtual de las mismas.

ESTELA	DIMENSIONES
A	218 x 146 x 76 cm
B	242 x 210 x 36 cm
C	242 x 137 x 29 cm
D	250 x 196 x 35 cm

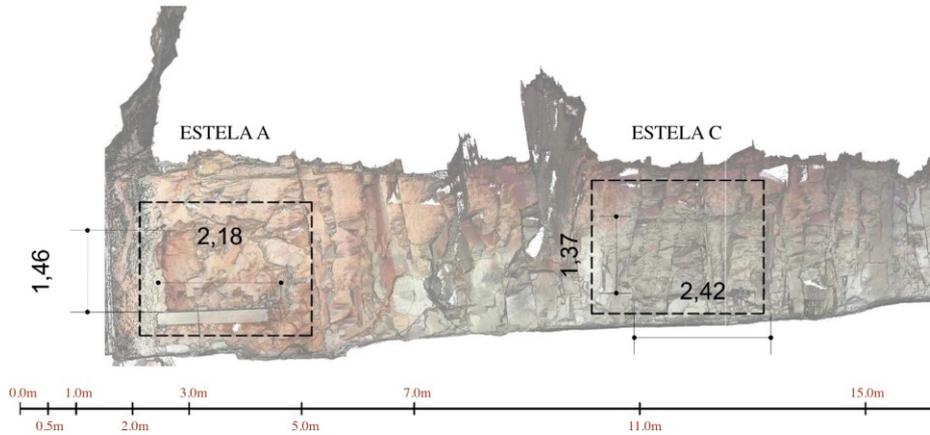
Según las dimensiones obtenidas, el espacio ocupado por la estela A tendría un tamaño de 218 x 146 x 76 cm. El resto de los nichos tallados para recibir las demás estelas presentarían los tamaños que quedan recogidos abajo en la Tabla 3; el aspecto de éstos puede observarse en la reconstrucción donde aparecen localizados por pared (Figs. 4a-b).

A priori, resulta llamativo la diferencia de anchura entre el nicho de la estela A (Fig. 5a) y el resto de los nichos (Figs. 5a-b). Concretamente, el nicho para la estela A muestra una diferencia de 24 cm con respecto a las estelas B y C, y de 32 cm con la estela D. En lo referente a la altura y a la profundidad de éstas, observamos aún una mayor variedad en los valores obtenidos, impidiendo poder establecer un valor estándar o promedio.

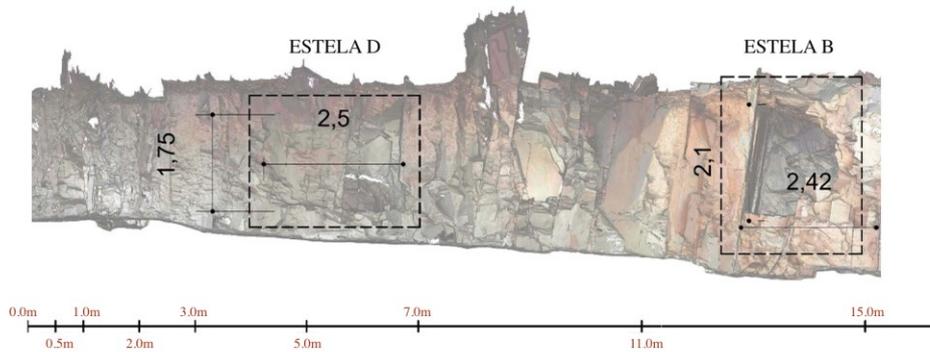
Es importante destacar que los arqueólogos de la expedición del MMA y del equipo MKTP solamente pudieron aportar datos sobre las medidas para la estela A (218 x 46 x 22 cm), los cuales se pueden comparar con el tamaño de su nicho (218 x 146 x 76 cm). Por otro lado, se observa que la anchura para las estelas es la misma, lo que puede tener cierta lógica al considerar que se debían asegurar que estuvieran bien sujetas y fijas en el hueco donde se colocaban. Hay que tener en cuenta, además, que las paredes de la tumba de Henenu, como otros hipogeos excavados en la roca de las necrópolis, pudieron estar forradas en piedra, por lo que estas estelas debieron ser encajadas con algún tipo de mortero o argamasa que las fijase a la pared y las embutiese con el resto de los bloques de piedra. Como consecuencia del expolio, sin embargo, es extremadamente difícil definir con exactitud el espacio de los nichos donde debieron estar erigidas o adosadas.

Por todo ello, nos hemos limitado a realizar un modelado basado en el tamaño, medidas y detalles del aspecto facilitado por los investigadores previos y los datos obtenidos a través de nuestro proyecto, siendo la base para crear el modelo 3D. A diferencia de otros proyectos en Egipto que se han limitado a realizar una renderización del espacio y se han centrado, sobre todo, en el aspecto y las texturas de las construcciones arquitectónicas, en esta tarea del MKTP se han empleado los datos acumulados mediante métodos manuales (epigrafía manual, mediciones de fragmentos, documentación tradicional como el dibujo o la fotografía) para transferirlos al ámbito de lo virtual y realizar cálculos relativos al tamaño de estelas y de nichos donde pudieran haber sido erigidas (véase una aproximación similar aunque limitada a la combinación de técnicas fotogramétricas en Perú en el estudio de Pierdicca et al., 2016). En el caso de la estela A, este estudio demuestra que encajaría perfectamente en el hueco del nicho de entrada a la tumba, desnudo en la actualidad. En cuanto al resto de estelas, al desconocer las medidas para las estelas B, C y D, se ha optado por extrapolar las que se poseen de la estela A para las reconstrucciones de las mismas, sirviendo como punto de partida para futuros trabajos de reconstrucción digital/virtual.

⁴ El material PBR fue realizado por Frederic Hoffmann y se obtuvo de <https://www.renderhub.com/nudelkopf/sandstone-pbr-material>.

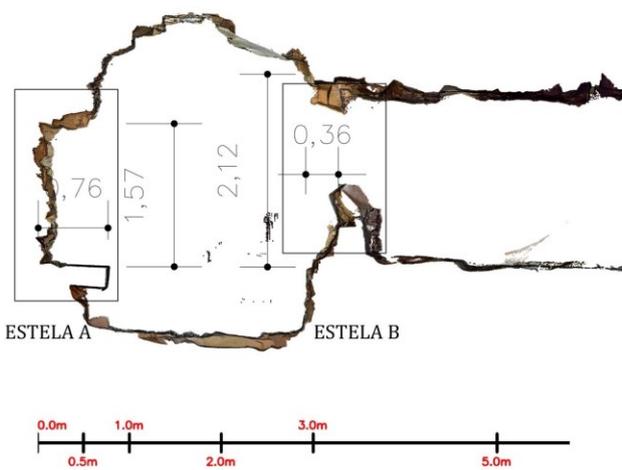


(a) Ortofotografía real del muro oeste

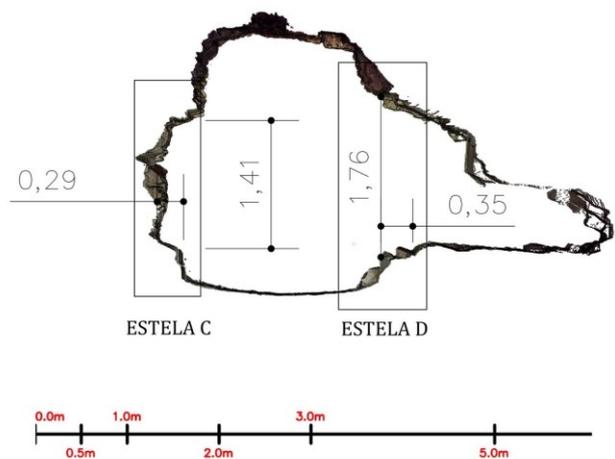


(b) Ortofotografía real del muro este

Figure 4: Ortofotografías del pasillo de la tumba de Henenu: (a) Ortofotografía real del muro oeste (superior) y (b) ortofotografía real del muro este (inferior): con detalle de nichos originales –sin la presencia de bloques de piedra del enlucido superficial original– tallados para recibir las cuatro estelas del pasillo principal.



(a) Ortofotografía real acotada de la sección de estelas A y B



(b) Ortofotografía real acotada de la sección de estelas C y D

Figure 5: Ortofotografías de las secciones del pasillo: (a) Ortofotografía real acotada de las secciones de los sectores del pasillo con los nichos originales para las estelas A y B; (b) y ortofotografía para las estelas C y D.

4. Conclusiones

A pesar de no ser el objetivo fundamental del presente trabajo, la elaboración de esta investigación en el marco de los estudios del MKTP en Tebas ha servido para desmontar una de las ideas preconcebidas sobre la arqueología virtual. Dentro del propio ámbito de trabajo de esta subdisciplina de la arqueología, cuando se habla de la utilización de métodos virtuales en arqueología, se piensa que la finalidad es meramente “de difusión” (Lucarelli et al., 2023; Arias et al., 2022). Se entiende entonces que sólo tiene como objetivo obtener unos *renders* de gran detalle que ayuden a las personas ajenas a la arqueología a entender un yacimiento, el proceso de excavación o la localización y aspecto de un edificio u objeto. Evidentemente, la difusión es uno de los objetivos de la aplicación de las técnicas de reconstrucción virtual en arqueología, pero su aplicación en la investigación es también un hecho. Este artículo constata cómo el flujo de trabajo con aspectos de la arqueología virtual ha permitido transferir los hallazgos realizados en el terreno al ámbito de la reconstrucción arquitectónica y, con ello, proceder a realizar cálculos sobre las dimensiones y volúmenes de una serie de estelas, sobre todo la llamada estela A, permitiendo establecer la posible localización de las mismas.

En el caso de estudio que se planteaba con las estelas funerarias de Henenu, mediante la combinación de varias técnicas, como el escaneado láser, el modelado 3D y el texturizado digital, se ha podido obtener una réplica exacta tanto de la tumba de este oficial como de la estela A erigida en el pasillo de acceso de su hipogeo. La investigación presente ha mostrado en detalle cada una de las fases de este flujo de trabajo que conectaba con la siguiente hasta alcanzar los resultados finales deseados. A partir de múltiples fragmentos, el examen epigráfico para su categorización, la comprobación de posibles medidas y la capacidad de las nuevas tecnologías de extrapolar datos para realizar cálculos amplios (Picardo, 2023), se ha podido justificar las medidas aproximadas y la localización original de las cuatro estelas de Henenu, atendiendo además a otros detalles del aspecto, ajuste y fijación de la estela A en concreto.

References

- Allen, J. P. (1996). Some Theban Officials of the Early Middle Kingdom. In P. Der Manuelian (Ed.), *Studies in Honor of William Kelly Simpson* (pp. 1–26). Boston: Museum of Fine Arts.
- Arias, F., Enríquez, C., Jurado, J. M., Ortega, L., Romero-Manchado, A. & Cubillas, J. J. (2022). Use of 3D models as a didactic resource in archaeology. A case study analysis. *Heritage Science*, 10(112), 1–15. <https://doi.org/10.1186/s40494-022-00738-x>
- Arnold, F. (1991). The High Stewards of the Early Middle Kingdom. *Göttinger Miszellen*, 122, 7–14.
- Bruyère, B., Davies, Ni. de G. & Davies, No. de G. (1925). New details for insertion in Theban 1/1000 scale maps: Sheykh 'Abd el-Qurna and Dira' Abu'l Naga. *Annales du Service des Antiquités de l'Égypte*, 25, 174–177, 239–241.
- Bryson, K. M. (2020). New technology and ancient images: the application of digital 3D imaging to the study of ancient Egyptian art. In J. Kamrin et al. (Eds.), *Guardian of ancient Egypt: studies in honor of Zahi Hawass I* (pp. 309–322). Prague: Charles University Press.
- Echeverría, E., Celis, F., Morales, A. J., & da Casa, F. (2018). The tomb of Henenu, Luxor, Egypt: underground surveying. In C. Gambardella (Ed.), *World Heritage and Knowledge. XVI International Forum, Naples 14 – Capri 15* (pp. 642–650). Napoli: Forum di Studi.

Con todo ello, ha sido posible reconstruir de manera virtual la posición in-situ de la mencionada estela con el objetivo de corroborar su posible colocación. Con estos cálculos asegurados, posteriormente se ha examinado si las estelas B, C y D habrían podido tener las mismas dimensiones. Consecuentemente, se ha planteado que en principio sería posible que las otras tres estelas hubieran sido mayores en base al tamaño de sus nichos o que se hubiera usado material complementario (e.g., piedra, mortero, madera) para rellenar los nichos en mayor medida que en el caso del nicho para la estela A. Como colofón, y reiterando lo dicho anteriormente, lamentablemente el expolio sufrido por esta tumba ha dificultado mucho la definición y medición del resto de estelas. Los hallazgos de nuevos fragmentos y el progreso del equipo epigráfico en su identificación de fragmentos y reconstrucción de los mismos contribuirán a aportar nuevos datos y plantear con ellos reconstrucciones mucho más precisas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido desarrollado bajo los auspicios del Middle Kingdom Theban Project: cambio social, innovación cultural, conflicto político y reconfiguración estatal en Tebas en el Primer Periodo Intermedio y Reino Medio, proyecto I+D+i “Generación de Conocimiento” financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (PID2020-114188GB-I00) y el proyecto Una nueva frontera en Egiptología: generación de modelos de documentación digital y computacional en tareas arqueológicas y epigráficas, iniciativa I+D “Prueba de Concepto” financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación (PDC2021-121406-I00). Además, se encuentra enmarcado en las líneas estratégicas del Grupo de Investigación de alto rendimiento CIARQ – Ciencias en la Arqueología, desarrollado en la UAH.

Supplementary files

This article contains supplementary files accessible via <https://doi.org/10.4995/var.2024.20670>

- Echeverría, E., Celis, F., Morales, A. J. & da Casa, F. (2019). The tomb of Ipi: 3D documentation in a Middle Kingdom Theban necropolis (Egypt, 2000 BCE). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W9, 319–324. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-319-2019>
- Engelbach, R. (1924). *A supplement to the topographical catalogue of the private tombs of Thebes (Nos. 253 to 334): with some notes on the necropolis from 1913 to 1924*. Cairo: Institut Français d'archéologie Orientale.
- Fakhry, A. (1947). A report on the Inspectorate of Upper Egypt. *Annales du Service des Antiquités de l'Égypte*, 46, 25–54.
- Gardiner, A. H., & Weigall, A. E. P. (1913). *A topographical catalogue of the private tombs of Thebes*. London: Bernard Quaritch.
- Gracia Zamacona, C. (2019). Imagining Henenu. *Near Eastern Archaeology*, 82(2), 75–81.
- Hayes, W. C. (1949). Career of the great steward Henenu under Nebhepetre Mentuhotpe. *Journal of Egyptian Archaeology*, 35, 43–49.
- Lori, F. V. L., & Rossi, C. (2020). 3D contour detection: a non-photorealistic rendering method for the analysis of Egyptian reliefs. *Antiquity*, 94(378), e34, 1–8. <https://doi.org/10.15184/aqy.2020.211>
- Lucarelli, R., Roberson, J. A., & Vinson, S. (Eds.) (2023). *Ancient Egypt, new technology: the present and future of computer visualization, virtual reality and other digital humanities in Egyptology*. Leiden–Boston: Brill Publishers.
- Lucarelli, R., & Johnston, K. (2022). Ancient Egyptian coffins in 3D: digital analysis, visualization and dissemination. In N. Lercari et al. (Eds.), *Preserving cultural heritage in the digital age: sending out an S.O.S.* (pp. 110–124). Sheffield: Equinox.
- Manuelian, P. Der (2020). An assessment of digital epigraphy and related technologies. In V. Davies & D. Laboury (Eds.), *The Oxford Handbook of Egyptian Epigraphy and Paleography* (pp. 387–404). New York: Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780190604653.013.26>
- Morales, A. J., Falk, S., Osman, M., Sánchez Casado, R., Shared, H., Yamamoto, K., & Zidan, E. (2016). The Middle Kingdom Theban Project: Preliminary report on the Freie Universität Berlin Mission to Deir el-Bahari. First and Second Seasons (2015–2016). *Studien zur Altägyptischen Kultur*, 45, 257–282.
- Morales, A. J., Abdelhady, R., Accetta, K., Alarcón, S., Bardají, T., Celis, F., ... & Zidan, E. H. (2017). The Middle Kingdom Theban Project: Preliminary report on the University of Alcalá Expedition to Deir el-Bahari. Third Season (2017). *Studien zur Altägyptischen Kultur*, 46, 153–190.
- Morales, A. J., Abdelhady, R., Accetta, K., Arranz, M., Bardají, T., Carrillo, M. F., ... & Yamamoto, K. (2018). The Middle Kingdom Theban Project: Preliminary report on the University of Alcalá Expedition to Deir el-Bahari. Third Season (2017). *Studien zur Altägyptischen Kultur*, 47, 183–221.
- Morales, A. J., Abdelhady, R., Alarcón, S., Alba, J. M., Andrews, E. J., Arranz, M., ... & Yvanez, E. (2022). The Middle Kingdom Theban Project: Preliminary report on the University of Alcalá Expedition to Deir el-Bahari (Fifth-Sixth Seasons & Study Season – 2020-2021). *Studien zur Altägyptischen Kultur*, 51, 133–177.
- Moreno, K. & Echeverría, E. (2019). The use of digital tools for the preservation of architectural, artistic and cultural heritage, through three-dimensional scanning and digital manufacturing. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W9, 501–506. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-501-2019>
- Moyano, J., Nieto-Julián, J. E., Bienvenido-Huertas, D., & Marín-García, D. (2020). Validation of Close-Range Photogrammetry for Architectural and Archaeological Heritage: Analysis of Point Density and 3D Mesh Geometry. *Remote Sensing*, 12(21), 1–22. <https://doi.org/10.3390/rs12213571>
- Mozas-Calvache, A. T., Pérez-García, J. L., Gómez López, J. M., Martínez de Dios, J. L., & Jiménez-Serrano, A. (2020). 3D models of the QH31, QH32 and QH33 tombs in Qubbet el Hawa (Aswan, Egypt). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B2-2020, 1427–1434. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-1427-2020>
- Navarro, P., Herráez, J., Mora, Á., Barros, H., & Denia, J. L. (2011). Aplicaciones de la Tecnología de digitalización tridimensional por la coordinación de monumentos históricos del Instituto Nacional de Arqueología e Historia (INAH) en México DF. (2009 y 2010). *Revista Expresión Gráfica Arquitectónica* 17, 42–53. <https://doi.org/10.4995/ega.2011.882>
- Olmo, L., Castro, M. & López-Macia, M. (2012). La utilización del Láser Scanner en el registro arqueológico: La experiencia de la Universidad de Alcalá. *Virtual Archaeology Review*, 3(5), 93–97. <https://doi.org/10.4995/var.2012.4531>

- Pedersen, S., & Gracia Zamacona, C. (2022). The sarcophagus of Henenu (TT313): Fragments from recent excavations, and pictures from old archives. In J. L. Montero Fenollós & L. Brage (Eds.), *Estudios de Orientalística y Egiptología: Nuevas aportaciones de la investigación española* (pp. 379–401). Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Picardo, N. (2023). "Where did that come from?!". The Giza Project's development of citation and referencing documentation for 3D archaeological visualizations. In R. Lucarelli, J. A. Roberson & S. Vinson (eds.), *Ancient Egypt, new technology: the present and future of computer visualization, virtual reality and other digital humanities in Egyptology* (pp. 374–428). Leiden–Boston: Brill Publishers. https://doi.org/10.1163/9789004501294_017
- Pierdicca, R., Frontoni, E., Malinverni, E. S., Colosi, F., & Orazi, R. (2016). Virtual reconstruction of archaeological heritage using a combination of photogrammetric techniques: Huaca Arco Iris, Chan Chan, Peru. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 3(3), 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2016.06.002>
- Serrano Lara, L. (2021). Archaeological documentation: three-dimensional modelling of artifacts. In A. Jiménez Serrano et al. (Eds.), *Results of the 2019 research season at Qubbet el-Hawa* (pp. 137–152). Jaén: Universidad de Jaén.
- Soliman, R. (2009). *Old and Middle Kingdom Theban Tombs*. London: Golden House Publications.
- Sykora, T., De Lima, R., De Meyer, M., Vergauwen, M., & Willems, H. (2023). In R. Lucarelli, J. A. Roberson & S. Vinson (Eds.), *Ancient Egypt, new technology: the present and future of computer visualization, virtual reality and other digital humanities in Egyptology* (pp. 532–550). Leiden–Boston: Brill Publishers. https://doi.org/10.1163/9789004501294_021
- Winlock, H. E. (sin fecha). *Notebooks III*. The Metropolitan Museum of Art, Theban Expedition tombs, c. 1920-1930. Archives of the Department of Egyptian Art. New York: The Metropolitan Museum of Art.
- Winlock, H. E. (1947). *The Rise and Fall of the Middle Kingdom in Thebes*. New York: Macmillan.
- Winlock, H. E. (1942). *Excavations at Deir el-Bahri 1911–1931*. New York: Macmillan.
- Wittur, J. (2013). *Computer-Generated 3D-Visualisations in Archaeology: Between Added Value and Deception*. Oxford: Archaeopress. <https://doi.org/10.30861/9781407310718>