

RESEARCH ARTICLE

Increase in the geotechnical heritage of rock cut-tomb builders between the Old and Middle Kingdom (Qubbet el-Hawa Necropolis, Aswan)

Aumento en el acervo geotécnico de los constructores de hipogeos entre los Reinos Antiguo y Medio (Necrópolis Qubbet el-Hawa, Asuán)

Juan Antonio Martínez Hermoso^{1*}, Israel García Mellado^{2,3}, Mario Sánchez Gómez³.

¹Grupo de investigación Qubbet el-Hawa, Universidad de Jaén, 23071, Jaén

²IGEA Consultoría y Laboratorio SLL. C/ Torrejón nº 49, 23170, La Guardia, Jaén

³Departamento de Geología y Laboratorio de Riesgos Naturales del CEACTEMA, Universidad de Jaén, 23071, Jaén

Corresponding author: juanantoniomartinezhermoso@gmail.com (Juan Antonio Martínez Hermoso)

ABSTRACT

Key points:

Qubbet el-Hawa was the main necropolis of Elephantine, at least from the middle of the 6th Dynasty to the end of the 12th Dynasty.

The tombs were excavated in the middle of the slope, at a level where sandstone predominates and the stratification is practically horizontal.

The work was carried out taking advantage of the weak surfaces of the rock mass, both the stratification planes and the joints.

Keywords: Joint; Ancient Egyptian architecture; Rock-cut tomb; Slide; Slope stability; Rock Mechanics

Article History:

Received: 03/09/2023

Accepted: 29/12/2023

The hill of Qubbet el-Hawa was the site chosen for the cemetery of the high officials of the southernmost province of Ancient Egypt, from the end of the Old Kingdom to the end of the Middle Kingdom. To date, around a hundred tombs excavated in the rock have been discovered in the middle of the hillside, distributed throughout several superimposed terraces. From the geological/geotechnical study it was the best possible location, in a section where sandstone predominates, delimited by two especially resistant strata that serve as the floor and roof of the hypogea, which in principle guaranteed their stability. In this article we analyze two representative tombs from the two most important periods of the cemetery: QH34h (Sixth Dynasty) and QH33 (Twelfth Dynasty), built with a time difference of about 400 years. From the fracturing study and the analysis of the geological stability in these tombs, we verified that the most modern (QH33), compared to the oldest (QH34h), presents construction and design innovations that solved the stability problems that some of the oldest tombs presented. The oldest graves. This study shows that, firstly, the choice of the location of the tombs was made based on the resistant nature of the strata, secondly, that the construction methods used by the ancient Egyptians were conditioned by the geology of the hill and, thirdly that, as a result of the experience acquired over the years, the design of the tombs evolved to solve the stability problems of the rock mass.

RESUMEN

Puntos clave:

Qubbet el-Hawa fue la principal necrópolis de Elefantina, al menos desde mediados de la Dinastía VI hasta el final de la Dinastía XII.

Las tumbas se excavaban a media ladera, en un nivel donde predominan las areniscas y la estratificación es prácticamente horizontal.

Los trabajos se llevaban a cabo aprovechando las superficies de debilidad del macizo rocoso, tanto los planos de estratificación como las diaclasas.

Palabras clave: Deslizamiento; Diaclasa; Estabilidad de laderas; Hipogeo; Arquitectura del Antiguo Egipto; Mecánica de Rocas

La colina de Qubbet el-Hawa fue el lugar elegido para el cementerio de los altos funcionarios de la provincia más meridional del Antiguo Egipto, desde finales del Reino Antiguo hasta finales del Reino Medio. Hasta la fecha se han descubierto, a media ladera, un centenar de tumbas excavadas en la roca distribuidas en varias terrazas superpuestas. Del estudio geológico/geotécnico se desprende que no había mejor emplazamiento, en un tramo donde predominan las areniscas, delimitado por dos estratos especialmente resistentes que sirven como suelo y techo de los hipogeos, lo que en principio garantizaba su estabilidad. En este artículo analizamos dos tumbas representativas de los dos períodos más importantes del cementerio: QH34h (Dinastía VI) y QH33 (Dinastía XII), construidas con una diferencia temporal de unos 400 años. A partir del estudio de fracturación y del análisis de la estabilidad geotécnica en estas tumbas comprobamos que la más moderna (QH33), respecto de la más antigua (QH34h), presenta innovaciones constructivas y de diseño que solucionaron los problemas de estabilidad que presentaban algunas de las tumbas más antiguas. Este estudio demuestra que, en primer lugar, la elección del emplazamiento de las tumbas se realizó en función de la naturaleza resistente de los estratos, en segundo lugar, que los métodos constructivos utilizados por los antiguos egipcios estaban condicionados por la geología de la colina y, en tercer lugar, que, resultado de la experiencia adquirida durante años, el diseño de las tumbas evolucionó para solucionar los problemas de estabilidad del macizo rocoso.

Historial del artículo:

Recibido: 03/09/2023

Aceptado: 29/12/2023

1. Introducción

Las construcciones de tumbas del Antiguo Egipto, desde el período dinástico temprano, evolucionaron hacia una mayor sofisticación (Edwards, 1993). En tiempos prehistóricos, se excavaban en el desierto tumbas pequeñas de poca profundidad, y quedaban señaladas mediante un discreto montículo de arena rodeado por un apilado de piedras. A partir de estas se desarrollan un modelo de tumbas con forma de mastaba construidas primero de ladrillos de adobe y más tarde de bloques de piedra (Barta, 2005; Bolshakov, 1997) que constaban de dos niveles: una parte sobresaliente dedicada al culto, y una parte subterránea, con una cámara de enterramiento a la que se accedía a través de un pozo vertical. Este esquema fue aumentando en complejidad, altura, profundidad y número de cámaras (de culto y enterramiento), hasta llegar a las tres pirámides arquetípicas.

Los investigadores encuentran como las sucesivas construcciones funerarias solucionan los problemas de construcciones anteriores. Un ejemplo muy estudiado es el proceso evolutivo que experimentan los sistemas constructivos en los complejos funerarios piramidales (Arnold, 1991), desde la construcción de la primera tumba real construida en piedra, con forma de pirámide

escalonada, en el complejo funerario de Zoser (Firth *et al.*, 1926; Lauer, 1988), en la necrópolis de Saqqara, de principios de la Dinastía III (reinado de Zoser: 2592-2544⁺²⁵ a.C), hasta la construcción de la famosa Gran pirámide de Keops (Maragioglio *and* Rinaldi, 1965; Stadelmann, 1990), en la meseta de Guiza, a principios de la Dinastía IV (reinado de Keops: 2509-2483⁺²⁵ a.C). En este proceso se pasó de utilizar pequeños bloques de piedra fácilmente manejables por una sola persona imitando el tradicional modo de construir con ladrillos de adobe, hasta emplear bloques de un peso promedio de 2,5 toneladas utilizadas en la pirámide con caras perfectamente lisas. Para todas las fechas de este trabajo (véase Hournung *et al.*, 2006), el superíndice (+25) indica que la propuesta cronológica puede variar + 25 años.

No obstante, muchas de las tumbas del Alto Egipto eran excavadas en la roca (rock cut-tomb en literatura anglosajona), adaptándose a los escarpes en las proximidades del Nilo, por lo que presentaban, lógicamente, problemas constructivos diferentes a las pirámides y mastabas de las zonas llanas (Dodson, 1997; Dodson *and* Ikram, 2008). Estos complejos subterráneos de tumbas (hipogeos) necesitaban de conocimientos no sólo constructivos o arquitectónicos, sino también geológicos y geotécnicos que permitan diseñar las

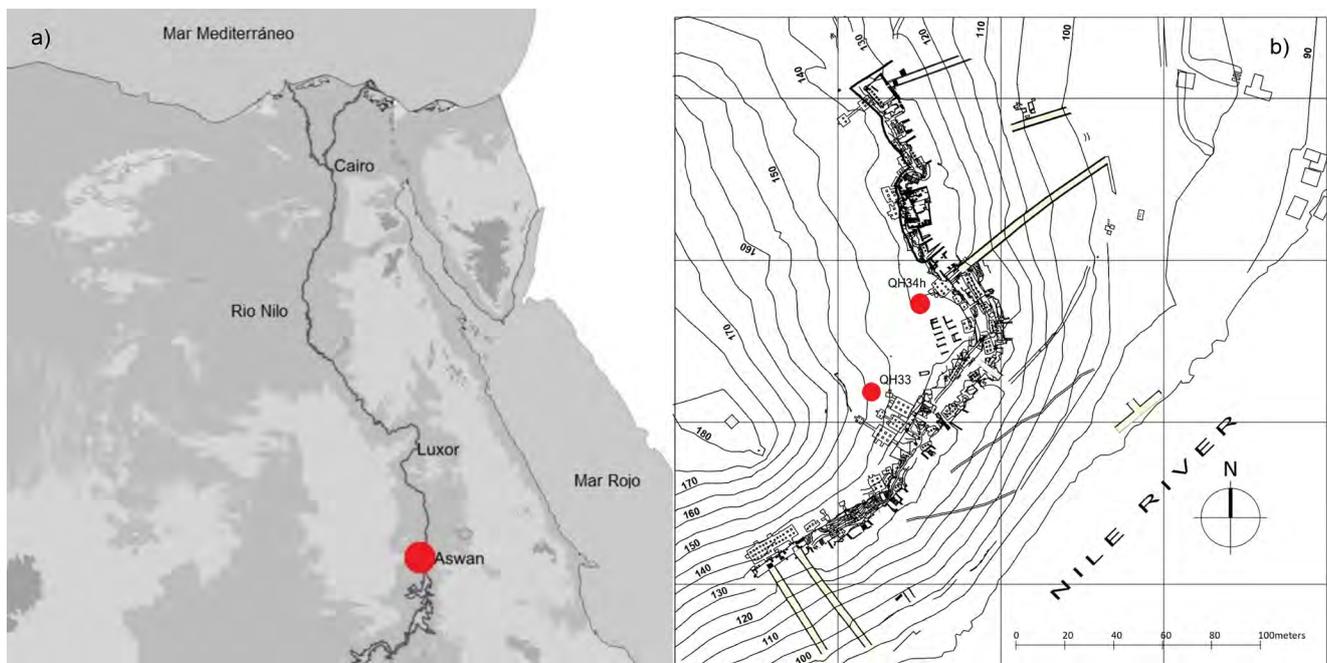


Figura 1. (a) Mapa de Egipto con la situación de la necrópolis de Qubbet el-Hawa. (b) Plano general de la necrópolis de Qubbet el-Hawa, con el emplazamiento de las tumbas QH34h y QH33, objeto de este estudio.

Figure 1. (a) Map of Egypt with the location of the Qubbet el-Hawa necropolis. (b) General plane of the Qubbet el-Hawa necropolis, with the location of tombs QH34h and QH33, object of this study.

tumbas estables y perdurables para la eternidad como era el deseo de sus inquilinos. En este sentido, por ejemplo, existen dos zonas claramente diferenciadas para la construcción de hipogeos: al norte de Esna predominan las calizas de carácter masivo y con grandes potencias (Clarke and Engelbach, 1990; Arnold, 1991), y al sur de esta ciudad las tumbas se excavan en bancos de areniscas intercalados con lutitas de grano más fino más alterables. A pesar de ello y a diferencia de los procedimientos constructivos de edificios exentos, no hay apenas estudios sobre la evolución de la construcción de hipogeos, y éstos suponen simples descripciones generales del método constructivo, sin entrar en análisis comparados (Arnold, 1991; Dobson, 1991).

En este trabajo pretendemos analizar las diferencias constructivas de dos hipogeos en la necrópolis de Qubbet el-Hawa (Asuán, Sur de Egipto) (figs. 1a y 1b), uno de finales del Reino Antiguo (QH34h, Fig. 7), construido durante el reinado de Pepy II, 2216-2153⁺²⁵ a.C. (Edel *et al.*, 2008) y otro de finales del Reino Medio (QH33, Fig. 8), construido durante el reinado de Amenemhat III, 1818-1773 a.C. (Jiménez Serrano *et al.*, 2010, 2014, 2018). Estos dos hipogeos, próximos, constituyen un modelo por su estado de conservación, y representan bien las características promedio de los casi un centenar de hipogeos inventariados en la necrópolis (Jiménez Serrano, 2013). Además, algunos tienen la particularidad que están inacabados aunque fueron utilizados, y que en ocasiones, durante algunas de las fases de su construcción eran aprovechados como canteras para la extracción de bloques que eran empleados para la elaboración de algunos elementos arquitectónicos de los propios hipogeos, como pilares y dinteles, y para las reparaciones de los mismos (en su caso), peldaños para las escalinatas y, en general, en obras de mampostería, así como de elementos decorativos como estatuas, mesas de ofrendas o estelas que formaban parte de su equipamiento funerario (Martínez Hermoso *et al.*, 2020).

Este hecho los convierte en un observatorio único para diseccionar cómo los constructores abordaban el proceso de excavación, y cómo se enfrentaban a los condicionantes que les planteaba el macizo rocoso, tanto los problemas de estabilidad, como aquellos derivados de la necesidad de extraer bloques de la mejor calidad posible. Dado que los hipogeos tienen en general un desarrollo mayor en la dirección paralela al talud de la ladera, se ha abordado el análisis de

estabilidad como un problema de taludes, más que como un problema de túneles.

Aunque, dado el tiempo transcurrido entre la construcción de ambos hipogeos (unos 400 años, según cronología de Hournung *et al.*, 2006), se desconoce si existía una continuidad escrita u oral en las escuelas arquitectónicas, queremos demostrar que el hipogeo más reciente soluciona los problemas geotécnicos que presentan los más antiguos. Es decir, preconizamos que, ya sea por una tradición continua o por la observación de los efectos que el tiempo iba causando en los hipogeos más antiguos, los constructores egipcios eran cuidadosos observadores del sustrato geológico y que lo tenían en consideración para sus diseños y procesos constructivos.

2. Objetivos

Algunas de las tumbas más antiguas de la necrópolis de Qubbet el-Hawa sufrieron derrumbes parciales de sus fachadas y de las zonas de los techos próximas a ellas, siendo una patología habitual que se presenta en el cementerio, por la naturaleza geológica de la colina donde se emplaza. La existencia de fallas y diaclasas con distintas orientaciones, según de la zona del cementerio, que generan roturas planares o en cuña dependiendo de la orientación de los planos de rotura, provocan deslizamientos de la masa rocosa a lo largo del plano de discontinuidad que, al excavar la tumba, quedaba descalzado en la cara del talud, lo se traduce en el consiguiente derrumbe de la parte exterior de las tumbas.

Este trabajo trata de demostrar que, resultado de la experiencia acumulada durante largos años por los antiguos constructores egipcios, en Qubbet el-Hawa se introducen una serie de mejoras de diseño y constructivas que buscaban solucionar los problemas de estabilidad que presentaban las tumbas más antiguas. Para ello, se ha realizado un estudio de fracturación y de estabilidad geológica, y también, se han comparado las características arquitectónicas de dos tumbas del cementerio de distintos períodos: QH34h de finales de la Dinastía VI, y QH33 de finales de la Dinastía XII, construidas con una separación de unos 400 años.

3. La necrópolis de Qubbet el-Hawa

La colina de Qubbet el-Hawa se encuentra situada en la orilla oeste del Nilo, a poco más de un kilómetro al norte de Elefantina, la capital de

Ta-seti, el Primer nomo del Alto Egipto (Fig. 1a). La colina constituye la elevación más prominente alzándose unos 180 metros sobre el nivel del mar, que en la región equivale a unos 90 metros sobre el actual nivel del Nilo (Müller, 1940; Storemyr, 2007). Emplazada en este lugar estratégico del paisaje, visible desde el valle del Nilo, la necrópolis produce un efecto imponente. A su vez, su posición elevada, permite gozar de vistas abiertas al Este, dominando las islas de la Primera Catarata y la ribera oriental del Nilo (Badawy, 1966; Giedion, 1981).

La presencia de la colina condiciona el curso del río Nilo y determina la disposición de los hipogeos que se distribuyen entre sus dos vertientes adaptándose a su topografía (Müller, 1940; Edel *et al.*, 2008). La ladera sureste presenta una pendiente muy pronunciada, más o menos continua (figs. 3 y 4). Por el contrario, la ladera noreste forma una terraza natural que fue aprovechada para la construcción de los primeros hipogeos de la necrópolis (Vieler, 2011). Con el paso del tiempo, mediante el tallado progresivo de otras partes más abruptas, que implicaban también el tallado en la roca de la explanada de entrada a los hipogeos, se fueron transformando en varias terrazas artificiales superpuestas.

La colina fue elegida como lugar de enterramiento por los gobernadores y altos funcionarios de Elefantina, principalmente durante el Reino Antiguo (Dinastía VI; 2543-2120⁺²⁵ a.C.) (Edel *et al.*, 2008), aunque también durante el Primer Período Intermedio (2118-1980⁺²⁵ a.C.) y el Reino Medio (Dinastía XII; 1980⁺¹⁶-1760 a.C.) (Martínez Hermoso, 2022, 47-48), con construcciones esporádicas y reocupaciones por funcionarios menores durante el Reino Nuevo (Dinastía XVIII: 1539-1292 a.C.) y la primera mitad del primer milenio a.C. (Jiménez Serrano, 2013).

Hasta el momento se han descubierto en las dos terrazas principales de la necrópolis de Qubbet el-Hawa más de 70 hipogeos entre el Reino Antiguo y el Primer Período Intermedio (Edel *et al.*, 2008), encontrándose los más importantes y monumentales en la terraza superior, entre las cotas 130-135 metros sobre el nivel del mar (Fig. 1b). Además, durante el Reino Medio, la necrópolis volvió a ser utilizada como lugar de enterramiento de la élite de Elefantina de funcionarios y gobernadores. De este período se han descubierto una docena de hipogeos, todos construidos también en la terraza superior (Martínez Hermoso, 2022, 91-97).

En general, la forma en la que los hipogeos van ocupando el espacio es reflejo de la estratificación social que seguiría vigente en el Más Allá. Por un lado, los hipogeos de los gobernadores se construían en la terraza superior, mientras que, por otro lado, los funcionarios subordinados de menor rango se enterraron en cotas inferiores pero siempre cerca de sus superiores jerárquicos (Jiménez Serrano, 2013). La ocupación de los sucesivos sectores de la necrópolis se hacía por familias, o durante períodos determinados, comenzando por construirse los hipogeos principales de los gobernadores, que elegían los lugares que permitían las mejores orientaciones y/o donde la roca era de mayor calidad. Los familiares más modestos y sus subordinados contemporáneos construían sus tumbas adaptándose a los espacios libres existentes entre los hipogeos principales.

Los complejos funerarios más importantes de la necrópolis desarrollaron, de forma condensada, la secuencia de los complejos funerarios de la realeza: una calzada ascendente, el templo funerario y la tumba propiamente dicha; estos dos últimos elementos excavados en la roca (Gideon, 1981). La parte exterior comienza con un modesto muelle en la orilla occidental para atracar las embarcaciones que transportaban en procesión el ataúd del fallecido y su séquito. Desde el muelle, a través de escalinatas, se ascendía hasta la terraza superior en la que se situaba el patio exterior de cada hipogeo (Martínez Hermoso, 2022, 59-63). Dentro de la parte excavada en la roca, la capilla funeraria se destinaba al culto y las ofrendas y se mantenía abierta. La cámara de enterramiento, por el contrario, no era accesible, ya que una vez alojado el ataúd quedaba sellada (Martínez Hermoso, 2022, 72-75).

3.1. Geología

La necrópolis de Qubbet el-Hawa se construye sobre rocas sedimentarias detríticas de edad Cretácico Superior (Klitzsch, 1990; Said, 1990) pertenecientes al Grupo "Areniscas de Nubia" (Whiteman, 1970; Youssef, 2003; Heldal, Boe and Müller, 2007). Zaghloul (1970) dividió la secuencia en tres formaciones que de muro a techo son (Fig. 3): la formación "Abu Agag" de edad Turoniense, la formación "Timsah" de edad Coniaciense; y por último la formación "Umm Barmil" de edad Santoniense. Esta secuencia se sitúa inconforme sobre granitos precámbricos (Heldal *et al.*, 2007) que asoman al sur del enclave en el cauce del río (Fig. 2).

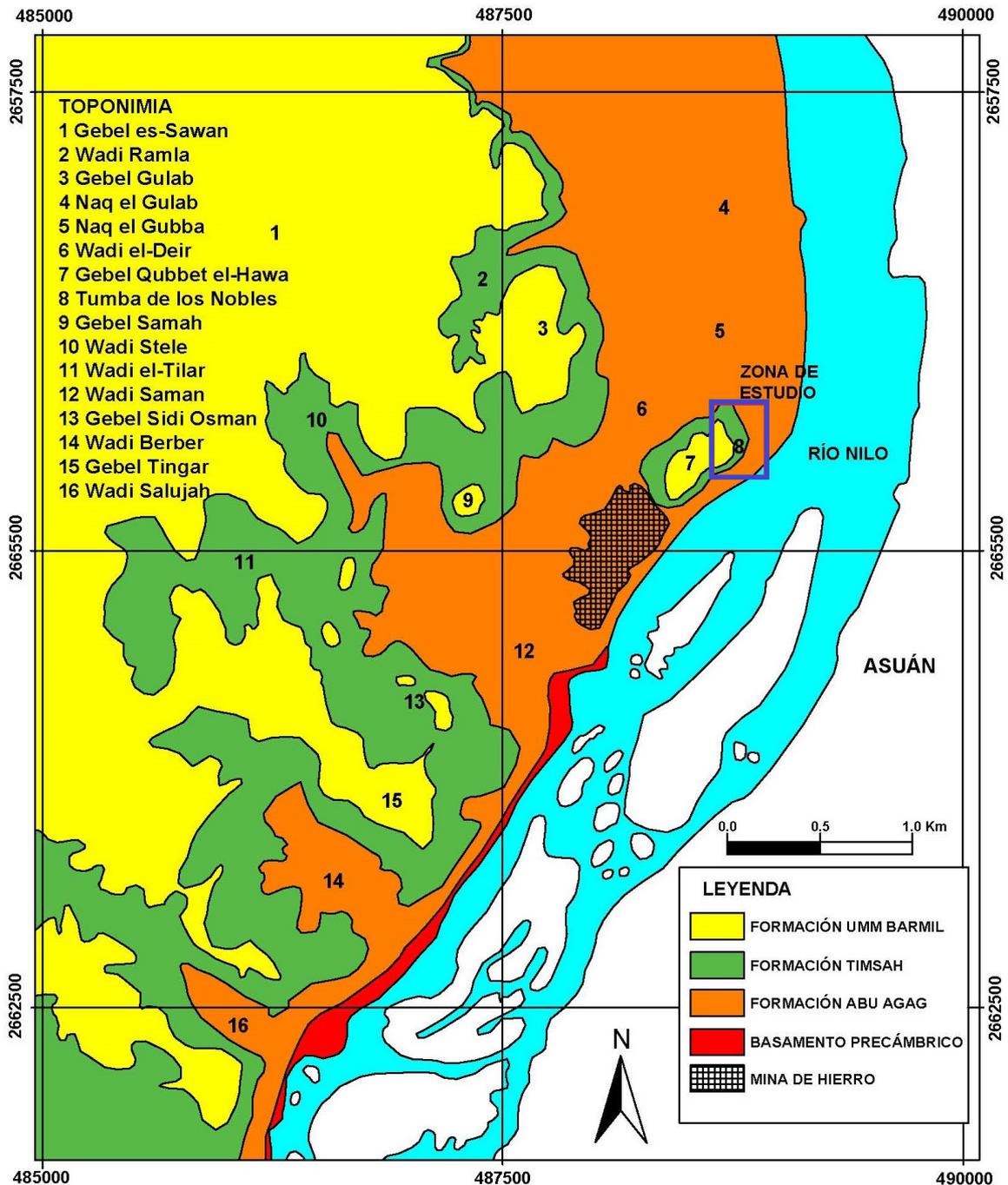


Figura 2. Mapa geológico de la ribera oeste del Nilo en Asuán. El recuadro indica la zona de estudio.

Figure 2. Geological map of the west bank of the Nile, Aswan. The rectangle indicates the study area.

La secuencia general, que puede observarse en la vertiente sureste (Fig. 4), está formada por tres paquetes de areniscas de 4 a 8 metros de espesor separados por dos tramos predominantemente lutíticos de unos 10 a 15 metros de potencia. El primer tramo de areniscas (Form. Abu Agag) se encuentra en la base de la secuencia y se caracteriza por el notable contenido en feldes-

patos y la presencia de intercalaciones de gravas. Conforme ascendemos, nos encontramos 10 metros de lutitas con esporádicas intercalaciones de areniscas (Form. Timsah). Seguidamente, el segundo paquete de areniscas (Form. Timsah) con un espesor de 6 metros, alberga un banco con pisolitos ferruginosos y niveles de hematites; a continuación 15 metros de lutitas. Por último, 4



Figura 3. Estratigrafía de la colina Qubbet el-Hawa vista desde la Ribera Oriental del Nilo.

Figure 3. Stratigraphy of the Qubbet el-Hawa hill seen from the East Bank of the Nile.

metros de areniscas silíceas con estratificación cruzada (Form. Umm Barmil), fuertemente cementadas, coronan la secuencia.

Tanto el banco de pisolitos de la Formación Timsah, como las areniscas silíceas cementadas de la Formación Umm Barmil, fueron aprovechadas en la zona desde periodos previos a la excavación de las tumbas que nos ocupan (Klemm and Klemm, 1993, 2008; Storemyr, 2007). Los pisolitos eran extraídos en los sectores en que la erosión los exponía en la superficie para la obtención de mena de hierro o de ocre, según la época (Degrise *et al.*, 2007). Por su parte, las areniscas silíceas fueron empleadas como materia prima de piedras de molino y herramientas abrasivas, y más tarde para esculturas, estelas, sarcófagos y otros elementos decorativos que llegaban a ser exportados Nilo abajo (Hedal and Storemyr, 2007).

En toda la necrópolis, la estratificación es prácticamente horizontal (figs. 4 y 5), o ligeramente inclinada hacia el Noroeste (menos de 5°). La

colina constituye desde el punto de vista geomorfológico un cerro testigo de resistencia adosado (Pedraza, 1996), cuya cumbre es continuación de la extensa penillanura de Kalabsha (Butzer and Hansen, 1968; Fig. 2). La ladera donde se ubica la necrópolis presenta un perfil característico de ladera compuesta (Gutiérrez, 2008) donde se puede ver tres resaltes de roca más resistentes (figs. 4 y 5, uno en la base correspondiente a areniscas de la formación Abu Agag, otro a media ladera (incluido en la formación Timsah) y un último en la parte superior, correspondientes a niveles más resistentes de areniscas silíceas de la formación Umm Barmil).

Para la construcción de la necrópolis se escogió el resalte intermedio, a media ladera. Concretamente los hipogeos fueron emplazados en un tramo de la serie estratigráfica situada entre las cotas 129 y 135 msnm donde predominan las areniscas (Fig. 5). A muro y a techo de estas cotas, se encuentran dos estratos especialmente resistentes por su contenido en cuarzo y óxidos

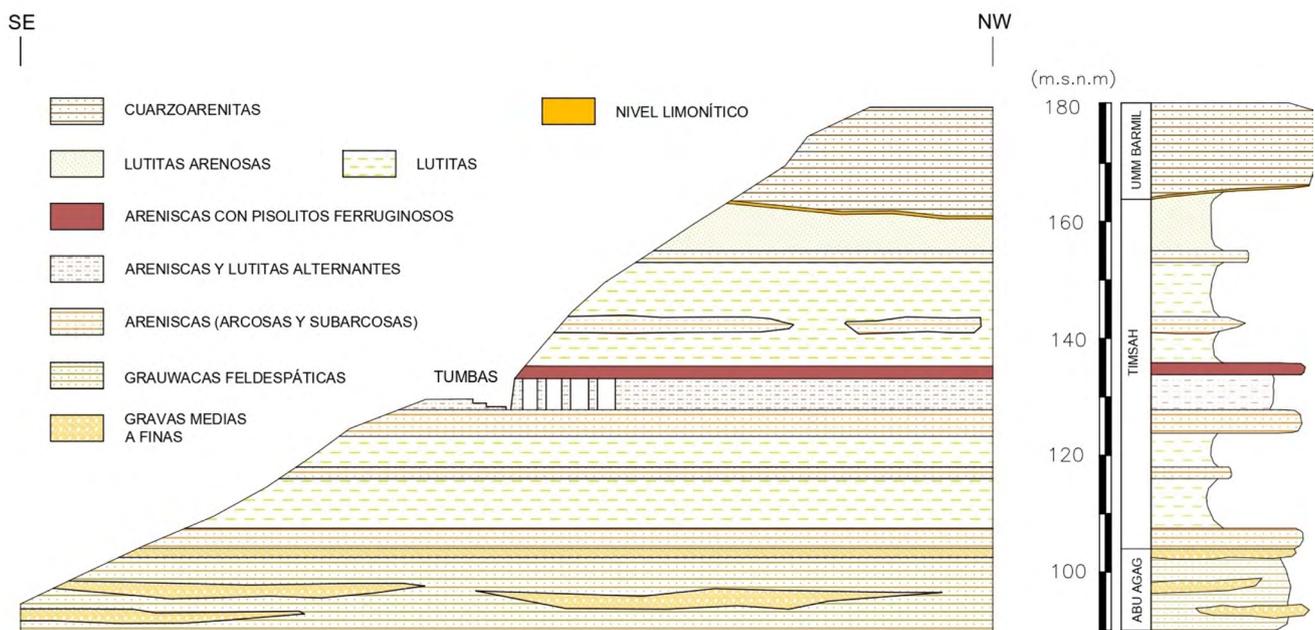


Figura 4. Corte estratigráfico de la colina de Qubbet el-Hawa.
Figure 4. Stratigraphic section of the Qubbet el-Hawa hill.

de hierro en la matriz (Figura 5, segunda columna empezando por la izquierda, Litología y Resistencia. Las categorías de resistencia y los rangos de valores se indican en la leyenda. RMB: roca muy blanda, RB: roca blanda; RM: roca de dureza media; RD: roca dura). Este tramo corresponde a la parte central de la Formación Timsah de un espesor total de 6 metros, situado entre dos secuencias eminentemente lutíticas de 10 a 15 metros de espesor. En detalle este tramo consiste en una alternancia de tres litologías: bancos de areniscas de 1.20 a 1.50 metros de potencia, capas de lutitas de 0.05 a 0.15 metros de potencia y niveles de óxidos de hierro (hematites, fundamentalmente) de 0.01 a 0.10 metros de espesor. Las areniscas suelen presentar estructuras sedimentarias como laminación cruzada en surco o tabular, o laminación paralela de alta energía. Las lutitas muestran laminación paralela de baja energía, y los óxidos de hierro se presentan como niveles de 0.01 a 0.02 centímetros de espesor constituyendo ferricretas, o bien como niveles de 0.10 metros de espesor intensamente bioturbados. En algunos bancos de areniscas, la matriz es muy abundante en hematites y en otros se han encontrado pisolitos ferruginosos.

El nivel de areniscas donde se localizan las tumbas está moderadamente fracturado, correspondiendo casi la totalidad de las fracturas a dia-

clasas. Sólo se han observado media docena de fallas normales con saltos que apenas alcanzan 0,5 metros. En general, se pueden encontrar fracturas en todas direcciones y con buzamientos variables, aunque el 80% supera los 70° (Fig. 6). No obstante, el 40% de las diaclasas se orientan entre las direcciones N140 y N170. Las fallas normales encontradas tienen una dirección N150-160, coincidente con el máximo de diaclasas, por lo que unas y otras pueden asociarse a un mismo estado de distensión regional. Otro pequeño máximo relativo de diaclasas (20%) tienen una dirección ortogonal a la dirección predominante.

Las fracturas presentan una continuidad o persistencia entre baja y media (1-10 metros) y un espaciado entre 0.6 y 6 metros. La apertura es más variable, con una proporción similar de fracturas abiertas (0,5-2.5 milímetros), moderadamente anchas (2.5-10 milímetros) y muy anchas (1-10 centímetros). Más de la mitad de las fracturas inventariadas no presentan relleno, especialmente las de aperturas menores. Las restantes presentan rellenos de yeso, tanto fibroso, como masivo o pulverulento. También son frecuentes rellenos de óxidos de hierro. Otros rellenos en menor proporción son arcillas, limos o incluso brechas, todos ellos limitados a fracturas con aperturas muy anchas.

4. Material y métodos

El análisis arquitectónico se ha realizado a partir del levantamiento planimétrico de los hipogeos, incluida la orientación de sus fachadas y la determinación de ejes principales. Este levantamiento se ha llevado a cabo mediante nivel láser, teodolito y mira de 4 metros de longitud con división centimétrica. Así mismo, se han analizado visualmente las marcas de los procesos de excavación y constructivos en roca y paramentos. Con ello, se ha discriminado entre tumbas inconclusas y terminadas, y se ha identificado la metodología empleada en la elaboración de las tumbas de cada periodo.

El análisis arquitectónico junto con el de estabilidad geotécnica se ha centrado en las tumbas QH34h (finales del Reino Antiguo) y QH33 (finales del Reino Medio), que aunque se construyeron con 4 siglos de diferencia, poseen dimensiones en planta y sección muy similares. No obstante se han realizado observaciones en toda la necrópolis con especial énfasis en los hipogeos con más problemas geotécnicos (p.e. QH30a, finales del Reino Antiguo) de tal forma que se las valoraciones obtenidas tengan una significación en todo el yacimiento.

El análisis geológico/geotécnico se ha realizado en toda la necrópolis, considerando el objeto de estudio la colina de Qubbet el-Hawa completa. La columna estratigráfica se ha levantado de forma convencional con flexómetro y cinta métrica. El tamaño de grano se ha determinado con calibre de una precisión de ± 0.02 milímetros y lupa de 20x. En el estudio geomecánico se ha empleado además brújula y clinómetro convencionales, registrando orientación, espaciado, continuidad, apertura y naturaleza del relleno, de 576 discontinuidades.

La resistencia de la matriz rocosa, se ha evaluado según el número de golpes del martillo y la capacidad del material para ser marcado con la navaja según procedimiento de la ISMR (1981). Se ha utilizado esta metodología más sencilla, ya que al tratarse de un yacimiento arqueológico y existir dificultad para introducir instrumentación adecuada en la zona (problemas logísticos, de seguridad y autorizaciones), no era posible otros ensayos más precisos, especialmente los que supusieran la alteración del yacimiento o la obtención, manipulación, traslado o destrucción de muestras, que podían ser confundidas con restos arqueológicos. El estudio de estabilidad se ha

obtenido a partir del análisis del valor del factor de seguridad en distintas circunstancias. Para ello se han considerado la cohesión y el ángulo de rozamiento interno obtenidos a partir de bibliografía (Jiménez Salas *and* de Justo Alpañés, 1975; López Marinas, 2002; González de Vallejo *et al.*, 2002; Yassein, 2006). No obstante el ángulo de rozamiento se ha contrastado con ensayos tipo “tilt test” realizados a pié de afloramiento en el macizo.

5. Resultados

5.1. Arquitectura de los hipogeos QH34h y QH33

El hipogeo QH34h (Fig. 7) destaca porque la mitad norte de su fachada y la parte del techo de su capilla interior contigua a ésta, se derrumbaron en la antigüedad, al producirse un colapso en este sector de la colina. Esta zona de la tumba es donde estructuralmente hoy se presentan las zonas más sensibles, concretamente en el punto medio y en los extremos del hueco que ha perforado su envolvente y en la base del pilar norte más próximo a la esquina derrumbada de la capilla (Sáenz Pérez *and* García Ruíz, 2019).

No obstante, la puerta de entrada se puede reconstruir a partir de las partes que se conservan de la misma: muro de fachada (1.65 metros de espesor, junto a la puerta), jamba sur (1.30 metros de frente y 1.52 metros de espesor) y mitad del dintel (altura del dintel: 0.80 metros y altura total de la puerta, incluido el dintel: 5.50 metros). Siguiendo el patrón de las puertas de los hipogeos de finales del Reino Antiguo, se puede deducir que las dimensiones del hueco de la puerta eran 4.70 metros de altura, 1.30 metros de anchura y 1.52 metros de profundidad (Barba *et al.*, 2022).

La capilla fue excavada adaptándose a la topografía de la colina. Su planta tiene forma casi rectangular de unos 95 metros cuadrados. Predomina la dimensión paralela a la fachada sobre la profundidad (pared oeste: 10.94 metros, pared sur: 8.20 metros). Su altura disminuye desde 4.50 metros, en la zona próxima a la fachada, hasta 4.30 metros en la zona más profunda, ya que el techo desciende suavemente hacia el interior, siguiendo la orientación de estratificación. El techo está sostenido por dos pórticos de pilares (2 x 4 pilares, Fig. 7) conectados entre sí mediante tímidos dinteles que descuelgan del techo sólo

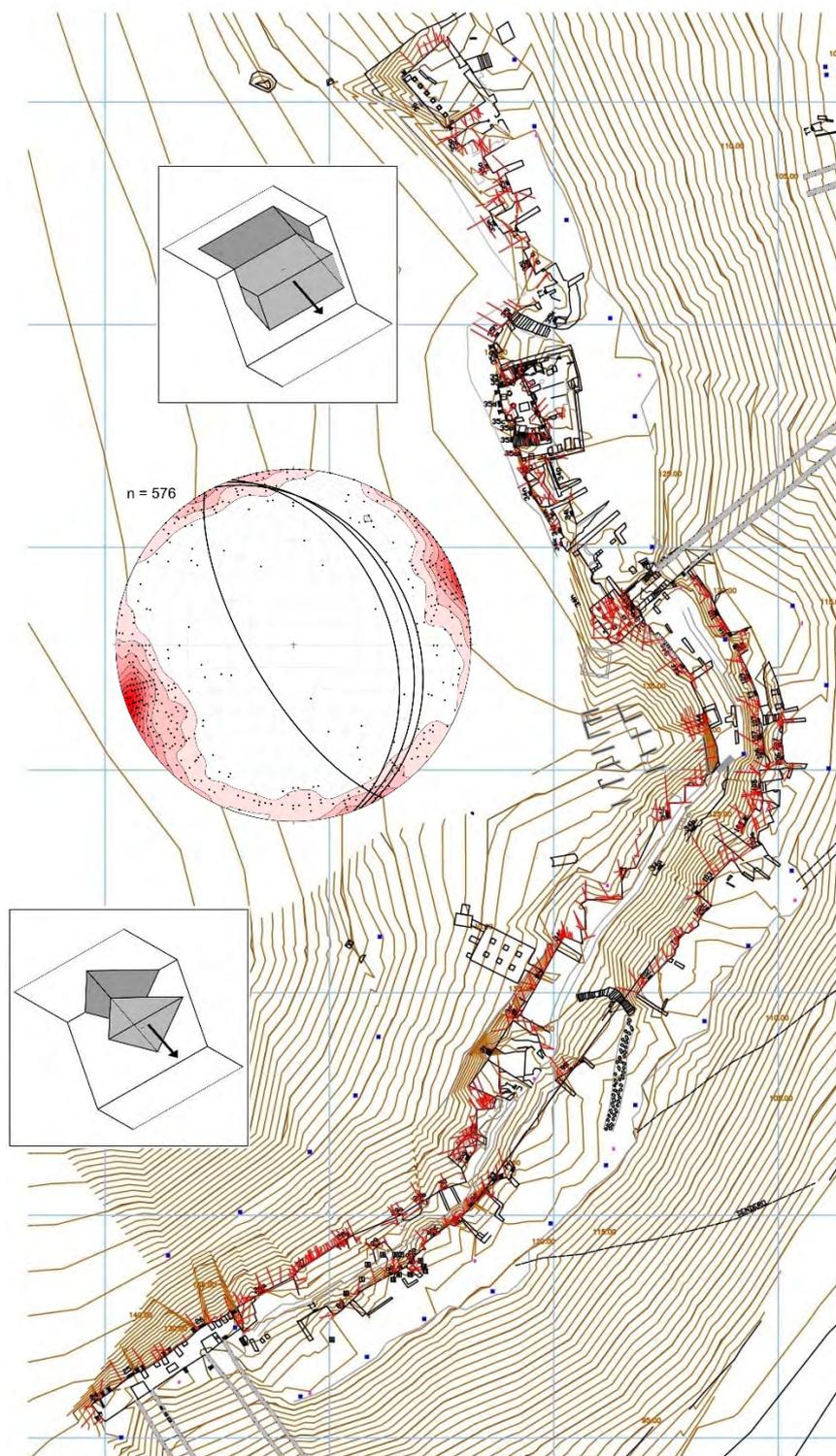


Figura 6. Plano general de fracturas en la necrópolis de Qubbet el Hawa, incluyendo la proyección estereográfica (igual área) del total de fracturas observadas. Las diaclasas se representan por sus polos, los contornos son del 1% de área. Las ciclográficas indican la orientación de 4 fallas normales encontradas. Obsérvese que la mayor parte de las diaclasas tienen una dirección similar a la de las fallas normales indicando una extensión NE-SO como la del mar Rojo; el otro máximo de menor valor es ortogonal a las fallas.

Figure 6. General plane of fractures in the Qubbet el Hawa necropolis, including the equal area stereographic projection of the total fractures observed. Joints are represented by the poles and by 1% area contours. The great circles correspond to 4 normal faults found. Note that most of the joints are oriented parallel to the faults, indicating a NE-SW regional extension as in the Red Sea; another secondary maximum is orthogonal to the faults.

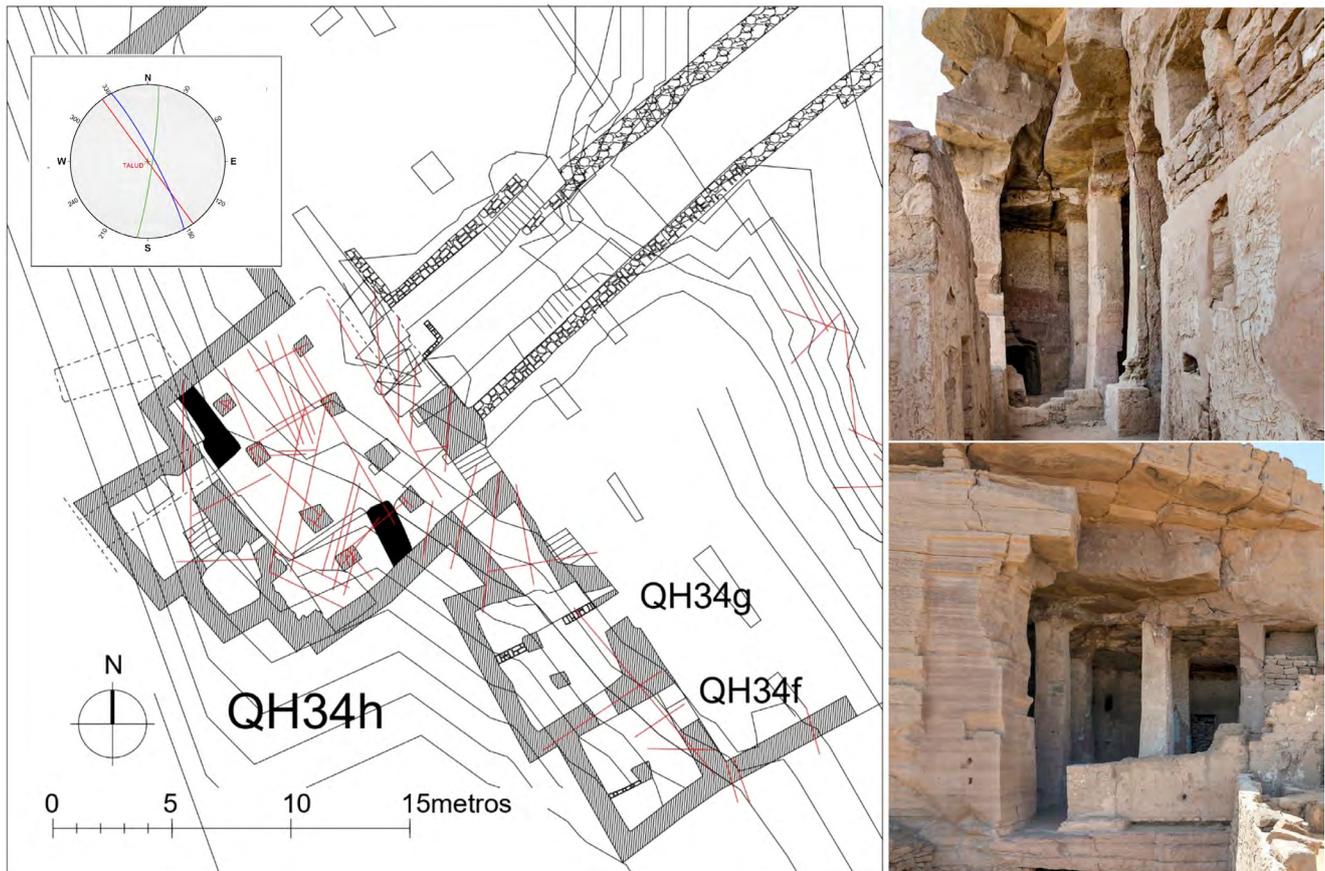


Figura 7. A la izquierda, plano de diaclasas de QH34h y proyección estereográfica equilateral de diaclasas medida en la tumba. A la derecha; arriba, interior de la capilla funeraria y, abajo, fachada parcialmente derrumbada de la tumba.

Figure 7. Left, joint plane of QH34h and equilateral stereographic projection of joints measured in the tomb. On the right; above, interior of the funerary chapel and, below, partially collapsed façade of the tomb.

unos centímetros, y que dividen la capilla en tres naves más o menos paralelas a la fachada.

La puerta falsa, frente a la cual se realizaban las ofrendas funerarias, en lugar de encontrarse en su posición habitual, centrada en la pared oeste, fue desplazada hacia el sur, más protegida, posiblemente tras haberse producido el derrumbe parcial del hipogeo.

El hipogeo QH33 (Fig. 8) posee una puerta de entrada centrada en la fachada como en QH34h, aunque ya no cuenta con el característico cajeadado perimetral de los hipogeos del Reino Antiguo. Sus dimensiones son 4.83 metros de altura, 1.30 metros de anchura y 1.04 metros de profundidad. Aunque las dimensiones de la puerta son similares a las del hipogeo QH34h, el espesor del muro de fachada de QH33 ahora es mucho mayor (4.37 metros), que es salvado por un pequeño pasillo algo más ancho hasta llegar a la capilla (Martínez Hermoso, 2022, 185-187).

La capilla fue excavada perpendicular a la fachada, adentrándose más en la profundidad de la colina. Su planta, de algo más de 100 metros cuadrados, también tiene forma rectangular (11.92 x 6.86 metros cuadrados). La altura disminuye desde 4.74 metros en la zona próxima a la fachada, hasta 4.50 metros en la zona más profunda, ya que, al igual que en la otra tumba, el techo sigue la superficie de un estrato de roca. Éste también está sostenido por dos pórticos de pilares (2 x 3 pilares, Fig. 8) conectados entre sí mediante potentes dinteles de gran canto (0.60 metros) que dividen la capilla en tres naves perpendiculares al plano de fachada.

El santuario, elemento característico de los hipogeos del Reino Medio, y que tenía una función similar a la de las puertas falsas en el Reino Antiguo, se encuentra presidiendo la capilla, en la pared oeste, sobre el eje principal del hipogeo.

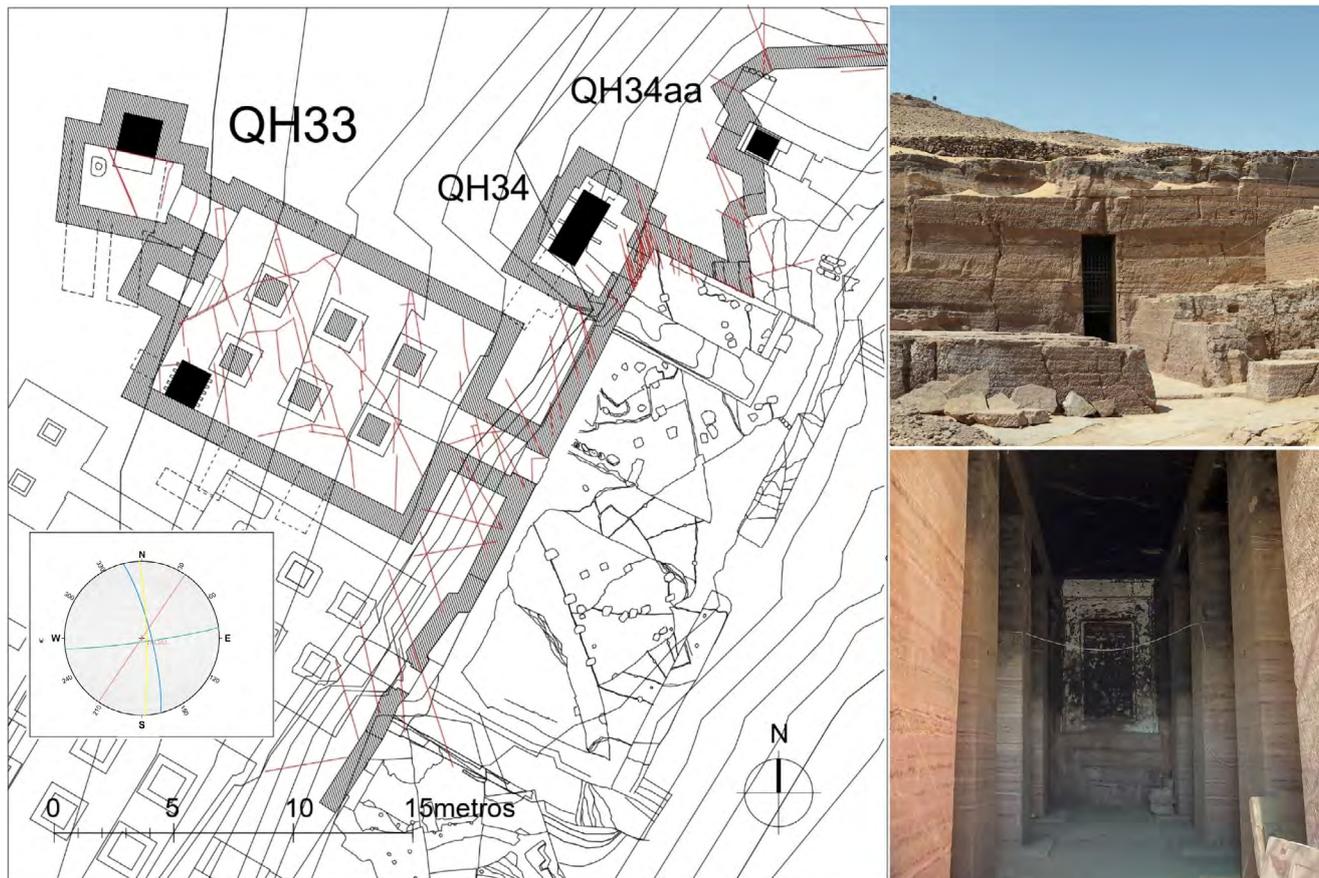


Figura 8. A la izquierda, plano de diaclasas de QH33 y proyección estereográfica equilateral de diaclasas medida en la tumba. A la derecha; arriba, fachada de la tumba y, abajo, interior de la capilla funeraria.

Figure 8. Left, joint plan of QH33h and equilateral stereographic projection of measured joints in the tomb. On the right; above, interior of the funerary chapel and, below, partially collapsed façade of the tomb.

5.2. Estudio de fracturación de las tumbas

Los hipogeos estudiados se encuentran en laderas con diferente orientación por lo que tienen un comportamiento distinto frente a los sistemas de fracturas predominantes de orientación N140-170°E. No obstante, como se indicó en el marco geológico, existen fracturas en todas las direcciones que pueden generar inestabilidades, por lo que se hace un análisis detallado de cada tumba. Por otra parte, existe una relación entre la fracturación y el proceso de excavación que será evaluado aquí.

La tumba QH33 tiene una fachada de orientación N034°E

La tumba QH34h tiene una fachada de orientación N144°E, 90°NE

Los problemas de estabilidad de la ladera normalmente se traducen en la vertiente SE de la colina en la rotura en cuña del talud (figs. 7 y 9),

mientras que en la vertiente NE se traduce en rotura planar (figs. 8 y 10).

5.2.1. TUMBA QH33

Teniendo en cuenta la dirección de fachada promedio para las tumbas desde la QH30a hasta la QH34c, ambas inclusive con un valor N034° E orientación SE, existen tres familias de discontinuidades concretas cuya intersección con el talud supone susceptibilidad a la rotura en cuña (Fig. 8).

Estas familias son las siguientes:

- 1.- N082°E, 86°SE con espaciado promedio 4.34 metros.
- 2.- N166°E, 80°NE con espaciado promedio 2.06 metros.
- 3.- N178 E, 85°NE con espaciado promedio 2.87 metros.

El análisis de estabilidad de la cuña formada por las familias A y B mediante el método gráfico de Hoek y Bray (Wyllie and Mah, 2004), sin tener



Figura 9. Derecha: Tumba QH107 con el mismo tipo de rotura planar que la tumba QH34h, donde se observa la rotura de un dintel de roca con un estrato horizontal. Izquierda: Tumba QH109 con diaclasa favorable a la rotura planar. Ejemplo de la posición del bloque antes del deslizamiento.

Figure 9. Right: Tomb QH107 with the same type of planar break as Tomb QH34h, where the breakage of a rock lintel with a horizontal stratum is observed. Left: Grave QH109 with a joint favorable for planar failure. Example of the position of the block before sliding.

en cuenta cohesión en la discontinuidad y considerando un ángulo de rozamiento en ambos planos de 40° , ha proporcionado un factor de seguridad $FS = 0.42$ que indica inestabilidad. Sin embargo, no se han producido desprendimientos en esta tumba y esto se debe al importante espesor de su fachada en relación al espaciado de las discontinuidades.

Resulta interesante comprobar la relación entre estos sistemas de diaclasas y los métodos de excavación en el patio inconcluso de la tumba QH33. De esta forma el rebaje se efectúa a favor de los sistemas de diaclasas existentes retirando los bloques de forma escalonada. Como consecuencia, los frentes de excavación tienen direcciones $N 82^\circ E$, $N 166^\circ E$ y $N 178^\circ E$. Teniendo en cuenta los espaciados de las familias y el espaciado medio de la estratificación (unos 10 centímetros), el tamaño de bloque extraído tendría unas dimensiones del orden de $0.10 \times 2.00 \times 3.75$ metros cúbicos, es decir un bloque de morfología tabular. Esto explica que los escalones del frente de excavación presenten poca altura y que el material extraído tenga un uso limitado en vistas a su aprovechamiento. En este sentido no serían materia prima válida para la confección de sarcófagos ya que estos precisan de mayor anchura de bloque.

Sus dimensiones son apropiadas por ejemplo para la confección de losetas que podrían haber-

se empleado en las escalinatas de acceso a la necrópolis desde el río.

5.2.2. TUMBA 34h

En el caso de la tumba QH34h, la dirección de la fachada es $N 144^\circ E$ con orientación de la fachada hacia el NE. Por tanto, las familias más desfavorables que pueden generar roturas son -a- y -b-. La familia -b- da lugar a la rotura planar, y la intersección de las familias -a- y -b- a rotura en cuña (Fig. 7):

Familia -a- = $N008 E 85^\circ SE$ con espaciado promedio 1.15 metros.

Familia -b- = $N152^\circ E, 83^\circ NE$ con espaciado promedio 0.70 metros.

El estudio de estabilidad para la rotura en cuña mediante los ábacos de Hoek y Bray (Wyllie and Mah, 2004) ha proporcionado un factor de seguridad $F = 1.34$ por lo que el riesgo de rotura en cuña es moderado.

Para calcular el factor de seguridad a la rotura planar consideraremos la siguiente ecuación:

$$FS = \tan\phi / \tan\alpha = \tan 40^\circ / \tan 83^\circ = 0.10$$

Donde:

ϕ = es el ángulo de rozamiento de la discontinuidad

α = es el buzamiento de la diaclasa

Al ser el factor de seguridad inferior a la unidad existe riesgo elevado de rotura planar, tal como ha ocurrido en esta tumba.

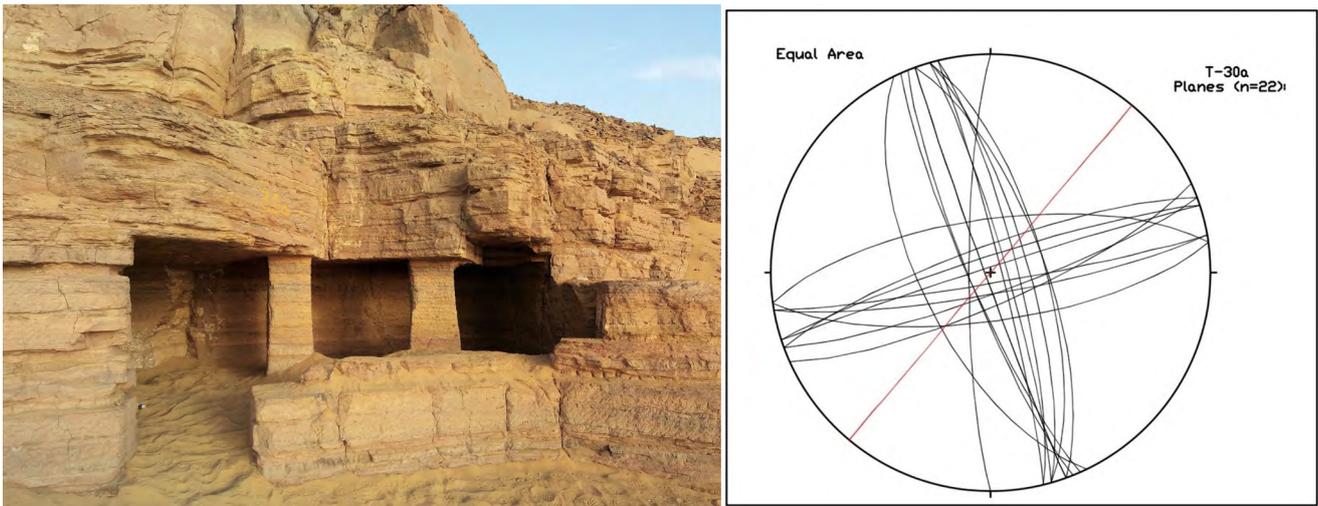


Figura 10. Vista del exterior de la tumba QH30a, y proyección estereográfica equilateral de las dos familias de diaclasas que han formado la cuña inestable.

Figure 10. Exterior view of tomb QH30a, and equilateral stereographic projection of joints measured in the tomb.

5.3. Análisis de estabilidad geotécnica

En la necrópolis de Qubbet el-Hawa, algunos de los hipogeos más antiguos han manifestado problemas de estabilidad (entre otros QH30a, en la vertiente sureste del cementerio, QH35m en la vertiente noreste, pero principalmente en la zona central del cementerio QH34b, QH34c y QH34h), consistentes en el derrumbe parcial o total de fachadas y el desprendimiento de bloques de techos (en zonas próximas a éstas), que no presentan los hipogeos más modernos.

Un claro ejemplo lo encontramos en el hipogeo QH30a, pero también se presenta en otros hipogeos de la necrópolis como es el caso de QH34h. El hipogeo QH30a tiene una fachada de 6.75 metros de longitud y 0.55 metros de espesor, y una cámara interior excavada paralela a ésta, de casi 20 metros cuadrados cuyo techo se sostiene con una hilera de cuatro pilares de sección cuadrada (0.50x 0.47 metros cuadrados).

En el hipogeo QH30a se produjo el derrumbe de la mitad norte de la fachada (quedando en pie solamente un zócalo de 1.00-1.50 metros de altura) y parte del techo próximo a ésta, que queda en voladizo con forma de "V" (Fig. 10) coincidente con la dirección de las dos familias de diaclasas que delimitan los bloques desprendidos. Sin duda, la ejecución errónea del hipogeo, con una separación entre el muro de fachada y la hilera de pilares, que supera el valor de espaciado de

las familias de discontinuidades del macizo rocoso, provocó el deslizamiento en cuña de la parte superior de la masa de roca a lo largo de la intersección de los planos de discontinuidad, que había quedado descalzado al excavar la fachada del hipogeo.

Estos problemas de estabilidad en el macizo rocoso llevaron a los constructores a replantear la planificación de las tumbas de la necrópolis.

La orientación de las distintas familias de diaclasas respecto al rumbo de la excavación es importante, pero se debe tener en cuenta que el propio proceso de excavación de las tumbas que contribuye a desestabilizar los bloques en dos sentidos:

1.- Por una parte al efectuar la excavación se elimina parte de la zona de fricción de la diaclasa lo que contribuye a disminuir el factor de seguridad hasta un 20 %.

Pongamos un ejemplo (Fig. 11):

Supongamos una diaclasa ondulada y rugosa con 60° de buzamiento de pequeña apertura que tiene un relleno de yeso y los siguientes parámetros de resistencia obtenidos a partir de bibliografía (González de Vallejo et al, 2002), adoptando la consideración de un relleno de tipo arcilloso cuya cohesión oscila entre 0 a 60 kN/m^2 y ángulos de rozamiento entre 25° a 42° :

Ángulo de rozamiento efectivo: 30°

Cohesión efectiva: $14,7 \text{ kN/m}^2$

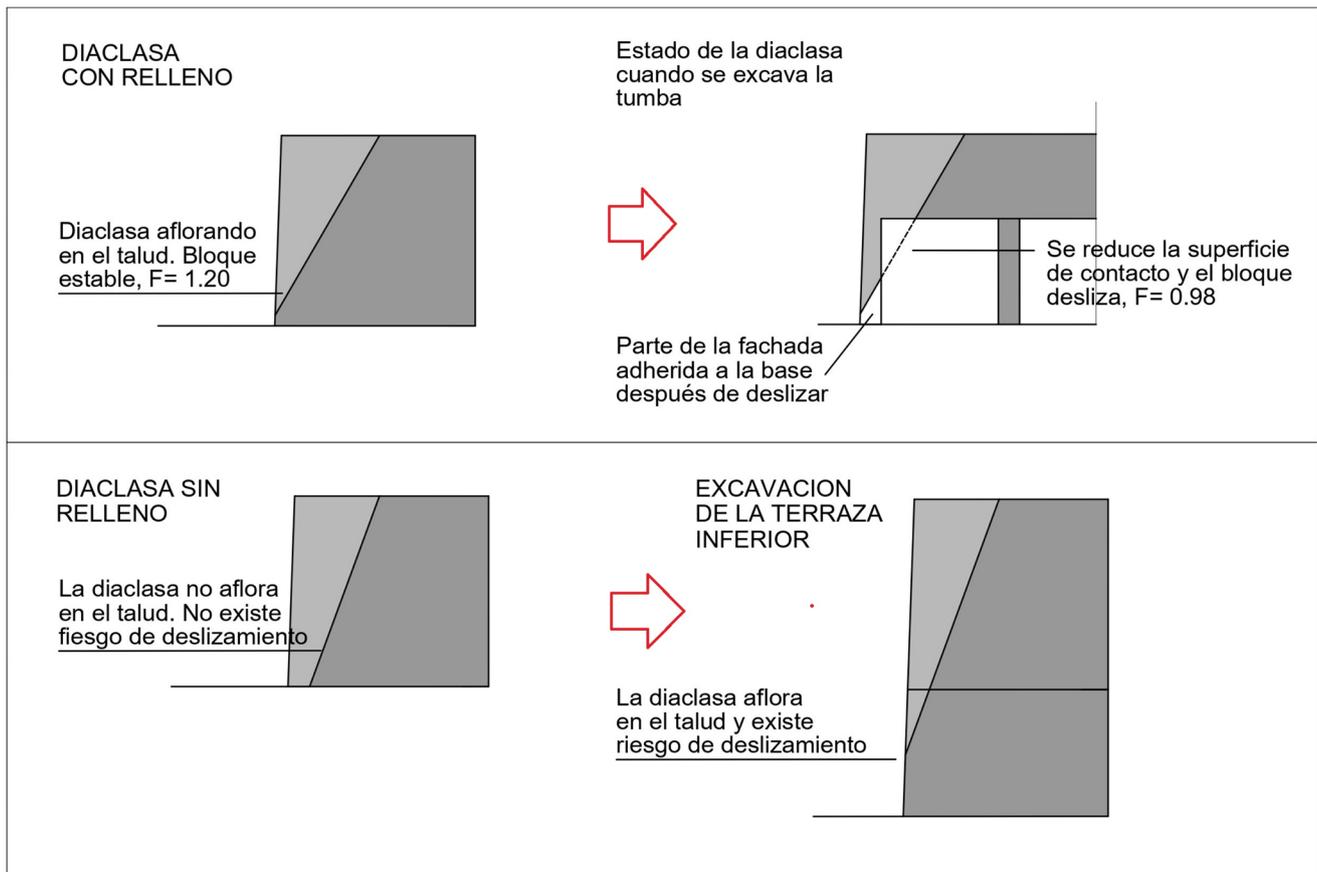


Figura 11. Esquema de cómo el proceso de excavación de la tumba contribuye a desestabilizar los bloques.
Figure 11. Diagram of how the process of excavating the tombs contributes to destabilize the blocks.

El ejemplo trata de ilustrar la disminución del factor de seguridad al excavar la tumba. La mayoría de las diaclasas en el yacimiento están abiertas sin ningún tipo de relleno.

El factor de seguridad al deslizamiento (FS) en una rotura planar se determina por la siguiente expresión:

$$FS = (c \times A + W \times \cos \alpha \times \tan \phi) / W \times \sin \alpha$$

Donde:

c = cohesión en el plano de la diaclasa

ϕ = ángulo de rozamiento en el plano de la diaclasa

A = Área del plano de la diaclasa

W = masa del bloque de roca

α = Buzamiento de la diaclasa

Antes de la excavación de la tumba tenemos:

$$W = 4,84 \text{ m}^2 \times 1 \text{ m} \times 19,6 \text{ kN/m}^3 = 94,8 \text{ kN}$$

Donde 4,84 m² representa el área de la sección de la cuña y 1 m la anchura de la cuña considerada.

Se ha tomado una densidad para la arenisca de 19,6 kN/m³

$$\text{Área de contacto} = 4,90 \text{ m} \times 1 \text{ m} = 4,90 \text{ m}^2$$

$$FS = (14,7 \text{ kN/m}^2 \times 4,90 \text{ m}^2 + 94,8 \text{ kN} \times \cos 60^\circ \times \tan 30^\circ) / 94,8 \text{ kN} \times \sin 60^\circ =$$

$$= (72,03 \text{ kN} + 27,36 \text{ kN}) / 82,09 \text{ kN} = 1,21$$

Con un factor de seguridad F = 1,21 el bloque puede considerarse estable

Después de la excavación del interior de la tumba:

$$\text{Disminuye la masa de la cuña: } W = 4,33 \text{ m}^2 \times 1 \text{ m} \times 19,6 \text{ kN/m}^3 = 84,68 \text{ kN}$$

$$\text{También disminuye el área de contacto} = 3,29 \text{ m} \times 1 \text{ m} = 3,29 \text{ m}^2$$

$$FS = (14,7 \text{ kN/m}^2 \times 3,29 \text{ m}^2 + 84,68 \text{ kN} \times \cos 60^\circ \times \tan 30^\circ) / 84,68 \text{ kN} \times \sin 60^\circ =$$

$$= (48,36 \text{ kN} + 24,44 \text{ kN}) / 73,33 \text{ kN} = 0,99$$

En este caso, al ser el factor de seguridad inferior a la unidad, el bloque es inestable y desliza.

2.- La excavación de una nueva tumba por debajo de la anterior, puede desestabilizar un bloque que antes era estable.

En este caso consideramos una diaclasa ondulada rugosa sin relleno por lo que la cohesión será nula. Como ángulo de rozamiento interno hemos tomado un valor de 40°.

Antes de la excavación de la nueva tumba la diaclasa no aflora, luego el bloque es estable.

Cuando se efectúa la excavación del talud de la tumba la diaclasa aflora en el talud, luego ahora sí puede deslizarse (Fig. 9).

El factor de seguridad al deslizamiento será:

$$W = 6.00 \text{ m}^2 \times 1 \text{ m} \times 19.6 \text{ kN/m}^3 = 117,6 \text{ kN}$$

$$FS = (117,6 \text{ kN} \times \text{Cos } 70^\circ \times \text{tg } 40^\circ) / 117,6 \text{ kN} \times \text{Sen } 70^\circ = 33,74 \text{ kN} / 110,50 \text{ kN} = 0,30$$

Por tanto, es inestable.

Si consideramos una diaclasa rellena con yeso con $\phi = 30^\circ$ y $c = 14,71 \text{ kN/m}^2$:

$$\text{Área de contacto} = 6,43 \text{ m} \times 1 \text{ m} = 6,43 \text{ m}^2$$

$$FS = (14,71 \text{ kN/m}^2 \cdot 6,43 \text{ m}^2 + 117,6 \text{ kN} \times \text{Cos } 70^\circ \times \text{tg } 30^\circ) / 110,50 \text{ kN} = 1,06$$

En estas condiciones el bloque está a punto de deslizarse. Si se efectúa una excavación en el interior, la reducción del área de contacto provocaría el deslizamiento.

Por último, indicaremos que una línea de fachada de mayor anchura, es menos susceptible a la rotura que una fachada de anchura reducida ya que la probabilidad de que el plano de la diaclasa aflore en el talud es menor.

6. Discusión

El emplazamiento de las tumbas de la necrópolis, a media ladera de la colina de Qubbet el-Hawa, no fue casual sino que fue seleccionada por los constructores en función de la naturaleza resistente de los estratos. De hecho, los hipogeos fueron excavados en un tramo donde predominan las areniscas, delimitado por dos estratos especialmente resistentes, que sirven como suelo y techo de los hipogeos, lo que garantiza su estabilidad.

En el resto de la colina no hay mejor emplazamiento: la formación Abu Agag se encuentra en la base de la colina y las areniscas allí presentes, bastante feldespáticas, se meteorizan con facilidad. En el tramo inferior y superior de la formación Timsah predominan las lutitas, roca con propiedades geotécnicas deficientes debido a su baja resistencia y estructura nodular. Por último, la formación Umm Barmil, en la parte superior de la colina, presenta diaclasas muy abiertas y la arenisca está silicificada, por lo que es más difícil de tallar.

El sistema de construcción utilizado y su relación con la estructura del macizo rocoso se conoce a partir de la observación del estado inconcluso de algunos de los hipogeos en comparación con otros que fueron terminados completamente, lo que ha hecho posible reconocer los métodos empleados en la construcción de los mismos, así como la manera en la fueron evolucionando a medida que se iban perfeccionando las técnicas utilizadas (Martínez Hermoso *et al.*, 2017; Martínez Hermoso *et al.*, 2020).

Los trabajos en el interior se iniciaban eligiendo el nivel de la altura del techo previsto para excavar un estrecho túnel preliminar, desde la puerta de entrada, siguiendo el eje principal del hipogeo. Una vez excavada la nave central, a izquierda y derecha, se excavaban túneles laterales para obtener la forma final de las cámaras, conservando la parte de roca donde situar los elementos portantes de la estructura (pilares y dinteles) (Arnold, 2003).

Las excavaciones se realizaban de arriba hacia abajo, y por niveles, condicionada por la distancia que alcanzaban los obreros con sus brazos, que extraían la roca aprovechando las superficies de debilidad del macizo rocoso, tanto los planos de estratificación como las diaclasas. Para ello se utilizaban como herramientas picos y cinceles de punta plana que eran golpeados con mazos de madera (Martínez Hermoso *et al.*, 2017; Martínez Hermoso *et al.*, 2020). No obstante, la técnica constructiva evolucionó, desde el trabajo tosco e inexperto de los constructores de los primeros hipogeos hasta la cuidadosa ejecución de los más modernos, en la que se utilizaron algunas herramientas auxiliares, como escuadras de madera y plomadas, que mejoraron las técnicas de replanteo y comprobación en obra (Martínez Hermoso *et al.*, 2020; Martínez Hermoso, 2022, 190-196).

Así, durante el Reino Antiguo, los hipogeos se caracterizan por la falta de precisión en la ejecución, con paredes y pilares sin alineaciones exactas, falta de planeidad en sus superficies y bastos acabados, por lo que solían cubrirse con un revestimiento de mortero de yeso (Vieler, 2011). Un buen ejemplo de esta falta de pericia constructiva es el hipogeo QH34h en el que, por ejemplo, la geometría y dimensiones de los pilares, así como su disposición dentro de la sala, son muy diversas (Tabla 1).

Por el contrario, durante el Reino Medio, los constructores alcanzaron la habilidad y la pericia

	QH34h	QH33
Luz máxima entre pilares (metros)	3.34	2.17
Sección del pilar (metros cuadrados)	0.70x0.80	1.12x1.08
Anchura del muro de fachada (metros)	1.65	4.37
Longitud del interior de la fachada (metros)	10.94	8.66
Longitud del interior de la fachada/ anchura del muro	6.63	1.98

Tabla 1. Dimensiones de las salas de los complejos funerarios QH34h y QH33.

Table 1. Dimensions of the rooms of the QH34h and QH33 funerary complexes.

para conseguir la completa horizontalidad de los suelos y la verticalidad de las paredes, que ahora presentan superficies completamente lisas y niveladas, y la perfecta alineación de los pilares, que fueron distribuidos equidistantes entre sí y con las paredes de las salas, manteniendo la misma geometría y dimensiones (Martínez Hermoso, 2022, 190-196). Un buen ejemplo de esta nueva manera de construir es el hipogeo QH33, que se distingue por la exactitud de sus formas y la perfección de sus acabados (Tabla 1).

Ahora bien, si comparamos los hipogeos QH34h y QH33, a pesar de contar con dimensiones en planta y altura muy similares, el interior de QH33 tiene la apariencia de ser mucho más compacto, a pesar de tener una superficie algo mayor y contar con dos pilares menos. Esto se debe a los cambios que se producen en la planificación de los hipogeos en función de la experiencia adquirida respecto a la estabilidad de tumbas previas.

Respecto al diseño general encontramos dos cambios significativos. Por un lado, aumenta considerablemente el espesor de los muros de fachada de los hipogeos más modernos (como es el caso de QH33) respecto a los más antiguos (caso de QH34h). De hecho, la relación entre la longitud y el espesor del muro de fachada pasa de 6.63 (QH34h) a 1.98 (QH33), lo que favorece la estabilidad de los hipogeos, ya que la probabilidad de que el plano de diaclasa aflore en el talud es menor. Y por otro lado, las salas de pilares de los hipogeos más modernos (por ejemplo, QH33) se excavan orientadas hacia el interior de la colina, en contraposición con los hipogeos más antiguos (por ejemplo, QH34h) que eran excavados paralelos a la topografía. Así, mientras que en QH34h la capilla se excava con una profundidad de 9.80

metros respecto a la línea de fachada, en el caso de QH33 alcanza los 16.30 metros de profundidad.

Respecto a los elementos arquitectónicos, también observamos dos cambios importantes: Por un lado, aumenta la sección de pilares y dinteles en los hipogeos más modernos (p.e. QH33) respecto a los más antiguos (p.e., QH34h) ya que parte de la sección de los pilares en esta última tumba han sido reducidos parcialmente debido a desprendimientos de bloques. De hecho, los pilares de QH34h destacan por su esbeltez frente a los potentes y pesados pilares de QH33, siendo la relación entre la altura y la sección de los pilares de 7.68 y 3.42, respectivamente. Sin embargo, este es un problema menor respecto a las fachadas, ya que mientras que éstas han sufrido derrumbes parciales, los problemas de estabilidad en el interior de las tumbas han sido mucho menores, aunque han motivado un diseño más conservador en algunos aspectos constructivos (dinteles, pilares y luces). Por otro lado, disminuye la distancia de separación entre pilares de los hipogeos más modernos respecto a los más antiguos, de tal manera que al emplear luces inferiores al espaciado de las discontinuidades reducían la probabilidad de desprendimientos de bloques del techo. Por ejemplo, mientras que en QH34h, la luz máxima entre pilares es de 3.34 metros, en el caso de QH33 la distancia que los separa disminuye hasta los 2.17 metros.

De hecho, el diseño interior de la tumba QH33 es excesivamente conservador teniendo en cuenta el mayor espaciado entre discontinuidades (2.00-4.00 metros), respecto al de la tumba QH34h, con un espaciado bastante menor (0.70-1.20 metros). En este sentido, podría haberse optimizado la construcción, pero no se hizo, pues-

to que la mala experiencia en los diseños anteriores incitó a una arquitectura menos arriesgada.

En general, puede afirmarse que al tratarse de tumbas poco profundas y con un desarrollo preferencial paralelo al talud, la principal fuente de inestabilidad viene derivada por procesos de ladera, intensificados por la generación de escarpes artificiales verticales durante los procesos de cantería de los patios de entrada y el labrado de fachadas decorativas. Las cuñas y roturas planares potenciales, generan bloques inestables de un tamaño significativo con respecto al tamaño total del hipogeo. La inestabilidad en áreas profundas de tumbas con un mayor desarrollo perpendicular a las fachadas es, comparativamente, mucho menor, máxime teniendo en cuenta que la necrópolis se desarrolló sobre la mejor formación geológica posible desde el punto de vista geotécnico, con una calidad geomecánica global buena, fuera de la zona de relajación próxima al talud. No obstante, aun así, los constructores de la necrópolis Qubbet el-Hawa muestran una evolución hacia soluciones más conservadoras con el aumento de las secciones de pilares y disminución de vanos.

7. Conclusiones

La necrópolis hipogea de Qubbet el-Hawa, desarrollada a lo largo de más de 800 años durante el antiguo Egipto sobre una formación de areniscas cerca de Asuán y en la ribera del Nilo, muestra una evolución constructiva condicionada por las características geotécnicas del sustrato geológico escogido.

En primer lugar, la propia elección de la ubicación de las tumbas en la ladera de la colina no es casual, sino que su posición en la formación rocosa más favorable, indica una reflexión previa de los primeros constructores en términos de idoneidad geomecánica, buscando un compromiso entre la calidad del macizo rocoso y la facilidad de labrado según la tecnología entonces existente.

También se demuestra que los métodos constructivos respecto al proceso de excavación están relacionados con las discontinuidades del macizo rocoso. Los constructores aprovechaban las zonas débiles para plantear el proceso de extracción de bloques, que posteriormente serían empleados para otros usos. Esta reflexión ha sido posible porque algunas de las tumbas principales de la necrópolis han quedado sin concluir.

El largo periodo de construcción en la ladera de Qubbet el-Hawa, permitieron a las sucesivas generaciones de alarifes ver la evolución de los hipogeos previos, y así aprender de los problemas de estabilidad en el macizo rocoso, fundamentalmente debido a procesos de ladera por la relajación que suponía el excavado de las fachadas. Roturas planares o en cuña, condicionaron un nuevo planteamiento en el diseño de las tumbas. Se modifica el método de construcción de las amplias salas en varios aspectos sustanciales, a saber: previsión de dinteles de gran canto, mayor sección de pilares y reducción de la luz entre los mismos, aumento del espesor del muro de fachada, y mayor desarrollo de la sala hacia el interior de la colina, de modo que el eje mayor de la tumba cambia de una posición paralela a la ladera, a una posición perpendicular.

En la colina se puede observar el resultado de la experiencia de excavación en el macizo rocoso desde el Reino Antiguo hasta Reino Nuevo. El presente trabajo se centra en los diseños arquitectónicos de dos hipogeos concretos, construidos en dos periodos diferentes: el hipogeo QH34h (Reino Antiguo) con el hipogeo QH33 (Reino Medio), pero los resultados se pueden extrapolar a toda la necrópolis conocida (excavada/estudiada) tanto en su extensión espacial como temporal.

Este estudio supone una novedosa aproximación al análisis de los criterios constructivos en la antigüedad desde la Ingeniería Geológica, siguiendo técnicas de reconocimiento geotécnicos propias de la Mecánica de Rocas (MERO). Estas técnicas habituales en los análisis de taludes y cavidades en obra civil y minería, podrían aplicarse con gran aprovechamiento al estudio de otros yacimientos arqueológicos que impliquen hipogeos tanto del Antiguo Egipto como de otras culturas y periodos. En el caso de Qubbet el-Hawa demuestra que ya en el Antiguo Egipto, los constructores observaban con atención las características mecánicas de los macizos rocosos y los fenómenos de inestabilidad, adoptando soluciones efectivas, similares a las que podría sugerir un ingeniero/geólogo actual.

Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación recibida para el desarrollo de este trabajo a través del Proyecto de Excelencia HAR2016-75533-P con título "Excavación, estudio histórico y conservación de las tumbas del Reino Medio de la necró-

polis de Qubbet el-Hawa (Asuán, Egipto)” del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO), así como al Laboratorio de Riesgos Naturales del CEACTEMA de la UJA. Agradecemos a Luis Jordá Bordehore y un revisor anónimo las sugerencias que han supuesto una clara mejora de este manuscrito.

Para la realización del presente trabajo se ha empleado el mapa topográfico, a escala 1:2000, equidistancia de curvas de nivel de 5 m y cuadrícula UTM Datum WGS-84, Zona 36R, del emplazamiento arqueológico de Qubbet el-Hawa, realizado por el topógrafo Juan Manuel Anguita Ordoñez (Jiménez Serrano *et al.*, 2009) que ha permitido posicionar la necrópolis en el contexto de la colina y a interpretar la forma de implantación de los hipogeos en la necrópolis.

Referencias

- Arnold, D. (1991). *Building in Egypt. Pharaonic Stone Masonry*. Oxford University Press, New York, 316 pp.
- Arnold, D. (2003). *The Encyclopaedia of Ancient Egyptian Architecture*. I.B. Tauris & Co Ltd., London, 274 pp.
- Badawy, A. (1966). *A History of Egyptian Architecture. The First Intermediate Period, the Middle Kingdom, and the Second Intermediate Period*. University of California Press, Berkeley and Los Angeles, 272 pp.
- Barba Colmenero, V., Martínez Hermoso, J. A., Mozas Calvache, A. T., Pérez García, J. L., and Jiménez Serrano, A. (2022). From tomb to church. Archaeological and architectural analysis of the Old Kingdom funerary complex (QH34h) and its transformation into a Byzantine Christian church in the Necropolis of Qubbet el-Hawa (Aswan, Egypt). *Arqueología de la Arquitectura* 19.
- Bárta, M. (2005). Architectural Innovations in the Development of the Non-Royal Tomb During the Reign of Nyuserra. In: *Structure and Significance Thoughts on Ancient Egyptian Architecture*, Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, 105-130.
- Bolshakov, A. O. (1997). Man and his double in Egyptian Ideology of the Old Kingdom. *Ägypten und Altes Testament. Studien zu Geschichte. Kultur und Religion Ägyptens und des Alten Testaments*, Band 37. Harrassowitz Verlag-Wiesbaden in Kommission, 336 pp.
- Butzer, K. W., and Hansen, C. L. (1968). *Desert and River in Nubia. Geomorphology and Prehistoric Environments at the Aswan Reservoir*. The University of Wisconsin Press. Madison, Milwaukee, and London, 562 pp.
- Clarke, S., and Engelbach, R. (1990). *Ancient Egyptian Construction and Architecture*. Dover Publications, Inc., New York, 242 pp.
- De Pedraza Gilsanz, J. (1996). *Geomorfología. Principios, Métodos y Aplicaciones*. Rueda, Madrid, 414 pp.
- Degryse, P., Storemyr, P., and Heddal, T. (2007). Notes on iron ore mining and smelting, and clay extraction at the West Bank of Aswan. In: N. Abu-Jaber, E., Bloxan, P., Degryse and T. Heddal (eds.), *QuarryScapes Report. Characterisation of complex quarry landscapes: an example from the West Bank quarries, Aswan. Work Package 4, Deliverable No. 4*, 141-149.
- Dodson, A. (1991). *Egyptian rock-cut tombs*. Shire Publications Ltd., London, 64 pp.
- Dodson, A., and Ikram, S. (2008). *The Tomb in Ancient Egypt*. Thames & Hudson Ltd, London, 367 pp.
- Edel, E., Seyfried, K. J., and Vieler, G. (2008). *Die Felsgräbernekropole der Qubbet el-Hawa bei Assuan. I. Abteilung. Architektur, Darstellungen, Texte, archäologischer Befund und Funde*. Ferdinand Schöningh, München, 2072 pp.
- Edwards, I. E. S. (1993). *The Pyramids of Egypt*. Penguin (Archaeology), London, 352 pp.
- Firth, C. M., and Gunn, B. (1926). *Excavations at Saqqara. Teti Pyramid Cemeteries. Vol. I Text, Vol. II Plates*. Imprimerie de L'Institut Français d'Archéologie Orientale, Le Caire, 288 pp.
- Giedion, S. (1981). *El presente eterno: Los comienzos de la arquitectura*. Alianza Forma, Madrid, 495 pp.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., and Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación. Madrid, 715 pp.
- Gutiérrez Elorza, M. (2008). *Geomorfología*. Pearson Educación. Madrid, 898 pp.
- Jiménez Salas, J. A., and de Justo Alpañés, J. L. (1975). *Geotecnia y Cimientos I. Mecánica de suelo y de las rocas*. Rueda. 2ª Edición. Madrid, 466 pp.
- Jiménez Serrano, A. (2013). “Los nobles de la VI Dinastía enterrados en Qubbet el-Hawa”. In: Agud, A., Cantera, A., Falero, R., El Hour, M.A., Manzano, R., Muñoz, and Yildiz, E. (eds.): *Séptimo Centenario de los Estudios Orientales en Salamanca (Estudios Filológicos 337)*, Salamanca: 29-37.
- Jiménez Serrano, A., Martínez de Dios, J. L., Valenti Costales, M., Vivas Fernández, F., De la Torre Robles, Y., and Anguita Ordoñez, J. M. (2009): *Proyecto Qubbet el-Hawa: Las tumbas nº 33, 34 y 34h. Segunda campaña (2009)*. BAEDE 19, 41-75.
- Jiménez Serrano, A., Alemán Aguilera, I., Botella López, M., Cardell Fernández, C., Martínez de Dios, J. L., Medina Sánchez, M. C., Mellado García, I., Prado Campos, B., Torrallas Tovar, S., De la Torre Robles, Y., and Valenti Costales, M. (2010). *Proyecto Qubbet el-Hawa: Las tumbas nº 33, 34 y 34h. Tercera campaña (2010)*. BAEDE 20, 65-97.

- Jiménez Serrano, A., Alemán Aguilera, I., Ayora Cañada, M. J., Botella López, M., Domínguez Vidal, A., Piquette, K. E., Rodríguez Ariza, M. O., Sáenz Pérez, M. P., Martínez de Dios, J. L., Alba Gómez, J. M., De la Torre Robles, Y., Martínez Hermoso, F., Martínez Hermoso, J. A., López-Obregón Silvestre, T., and Calero García, C. (2014). Proyecto Qubbet el-Hawa: Las tumbas 33, 34aa y QH34bb. Sexta campaña (2014). *BAEDE* 23, 7-48.
- Jiménez Serrano, A., Alba Gómez, J. M., Martínez de Dios, J. L., De la Torre Robles, Y., García González, L. M., Barba Colmenero, V., Caño Dortéz, A., Espejo, A. M., Bardonova, M., López Grande, M. J., Díaz Blanco, A., Correas Amador, M., Pérez Navazo, D., Domínguez Vidal, A., Ayora Cañada, M. J., Eschenbrenner, G., Botella López, M., Alemán Aguilera, I., Rubio Salvador, Á., Guimarey Duarte, R., Rodríguez Ariza, O., Montes Moya, E., Martínez Hermoso, J. A., Pérez García, J. L., Mozas Calvache, A., López-Obregón Silvestre, T., Tapia Ruano-Juan, S., Hernández Sánchez, R., Molinero Reyes, J. F., Krutzsch, M., and Hakin Karrar, A. (2018). Proyecto Qubbet el-Hawa: primeros resultados de los trabajos llevados a cabo en las tumbas QH32, QH33, QH34bb, QH35n, QH35p y QH36 durante la décima campaña (2018). *BAEDE* 27, 13-110.
- Heldal, T., and Storemyr, P. (2007). The quarries at the Aswan West Bank. In: N. Abu-Jaber, E., Bloxan, P., Degryse, and T. Heddal (eds.), *QuarryScapes Report. Characterisation of complex quarry landscapes: an example from the West Bank quarries, Aswan. Work Package 4, Deliverable No. 4*, 69-140.
- Heldal, T., BØE, R., and Müller, A. (2007). Geology and stone resources of the Aswan West Bank. In: N. Abu-Jaber, E., Bloxan, P., Degryse, and T. Heddal (eds.), *QuarryScapes Report. Characterisation of complex quarry landscapes: an example from the West Bank quarries, Aswan. Work Package 4, Deliverable No. 4*, 51-68.
- Hornung, E., Krauss, R., and Warburton, D. A. (2006). *Ancient Egyptian Chronology*. Boston: Brill, Leiden, 532 pp.
- Klemm, R., and Klemm, D. (1993). *Steine und Steinbrüche im Alten Ägypten*, Springer-Verl. Heidelberg, 465 pp.
- Klitzsch, E. (1990). Paleogeographical development and correlation of continental strata (former Nubian Sandstone) in Northeast Africa. *Journal of African Herat Sciences*, 10(1-2), 199-213.
- Lauer, J. P. (1988). *Le mystère des pyramides*. Paris: Presses de la Cité, 267 pp.
- López Marinas, J. M. (2002). *Geología aplicada a la ingeniería civil*. 2ª Edición. Cie Dossat 2002, Madrid, 564 pp.
- Maragioglio, C. A., and Rinaldi, V. (1965). *L'Architettura delle Piramidi Menfite 4. Le Grande Piramide di Cheope. Tavole*.
- Martínez Hermoso, J. A. (2022). *Qubbet el-Hawa en el Reino Medio: Arquitectura y Construcción*, UJA Editorial, Jaén, 390 pp.
- Martínez Hermoso, J. A., Mellado García, I., Martínez de Dios, J. L., Martínez Hermoso, F., Espejo Jiménez, A. M., and Jiménez Serrano, A. (2017). The construction of the Funerary Set QH31 (Sarenput II) - QH33. Part I: The exterior of the funerary complexes, *JAEA, Vol.3* (2018), 25-44.
- Martínez Hermoso, J. A., Ayora Cañada, M. J., and Domínguez Vidal, A. (2020). Elementos arquitectónicos de la capilla funeraria de Sarenput II (QH31) en Qubbet-el-Hawa. *Caracterización geoquímica*. *TdE*, 10-11, 227-240.
- Müller, H. W. (1940). *Die Felsengräber der Fürsten von Elephantine aus der Zeit des Mittleren Reiches*. Glückstadt-Hamburg-New York: Verlag J. J. Augustin, 118 [49] pp.
- Sáenz Pérez, M. P., and García Ruíz, L. M. (2019). Modelado y análisis estructural de la tumba de Khunes (QH34h) en Qubbet el-Hawa. *Determinación de las condiciones de estabilidad*, *TdE* 10, 359-371.
- Said, R. (ed.) (1990). *The Geology of Egypt*. A.A. Balkema. Rotterdam, 729 pp.
- Stadelmann, R. (1990). *Die Ägyptischen Pyramiden. Vom Ziegelbau zum Weltwunder*. Mainz, 313 pp.
- Storemyr, P. (2007). Outline of the geography and environmental history of the West Bank at Aswan. In: N. Abu-Jaber, E., Bloxan, P., Degryse, and T. Heddal (eds.), *QuarryScapes Report. Characterisation of complex quarry landscapes: an example from the West Bank quarries, Aswan. Work Package 4, Deliverable No. 4*, 9-20.
- Vieler, G. (2011). *Die Qubbet el-Hawa bei Assuan: Entdeckung und Architektur einer elitären Nekropole an Ägyptens Südgrenze/ The Qubbet el-Hawa bear Assuan. Discovery and architecture of an élite necropolis on Egypt's southern border*. In: L.D. Morenz et al. (eds), *Zwischen den Welten. Grabfunde von Ägyptens Südgrenze/ Between Worlds. Finds from tombs on Egypt's southern border*. Rahden, 97-121.
- Yassein, M. (2006). *Geological exploration for the Friendship, East Aswan, Egypt*. *IAEG 2006*, 707. 1-3.