

La construcción de las Pirámides de Egipto, evolución de la civilización y el cambio climático

Roque García Ruiz

roquegarcia1@gmail.com

Escuela de civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica Andrés Bello, Venezuela

Resumen

La construcción de grandes edificaciones por distintas civilizaciones ha sido una forma de dejar evidencia al mundo futuro de su poderío y bienestar. Las obras se convirtieron en el centro de generación de fuente de trabajo, trayendo como resultado la expansión económica en otras actividades como la alimentación relacionada con la agricultura y la cría de animales. El porqué de las pirámides constituye un tema religioso-social muy especializado, del cual no se amplía en la presente investigación, partiendo de la existencia de un megaproyecto que se desarrollara por etapas de acuerdo a la vida de los faraones de las distintas dinastías. La orientación de los lados de las pirámides con alta precisión con respecto a la norte-sur, así como su disposición de acuerdo a las constelaciones, son resultados de alto grado de conocimiento sobre instrumentos para mediciones y orientación. Para la pirámide de Keops, la explotación de la cantera para obtener más de 2.300.000 bloques de roca, constituyen principios básicos de geología, basado sus dimensiones en los planos de estratificación y las llamadas diaclasas, generalmente formando patrones de fracturas ortogonales. Así mismo el transporte de los bloques y su colocación, constituyén principios básicos de ingeniería civil, relacionada con un paisaje de bosques, donde la explotación de la madera constituyó el elemento principal para transporte mediante el sistema de rodillo y su colocación requirió rampas de pendiente adecuadas apoyadas sobre andamios construidos de madera procesada. El clima actual de desierto cubierto por arenas, contrasta con las condiciones climáticas que existían durante el desarrollo alcanzado de la civilización del Antiguo Imperio de Egipto, clima mediterráneo con abundancia de paisajes de bosques. Los cambios climáticos han ocurrido, en los últimos milenios, donde las civilizaciones se han adaptado, contando con el ingenio para evolucionar a un mejor bienestar.

Palabras claves: Cambio climático, Antiguo imperio egipcio, pirámides, clima mediterráneo, desierto, construcción.

The construction of the Egypt Pyramids, evolution of the civilization and climate change

Abstract

The construction of large buildings by different civilizations has been a way of leaving evidence to the future world of its power and well-being. The works became the center for generating a source of jobs, resulting in economic expansion in other activities such as food related to agriculture and animal husbandry. He because of the pyramids constitutes a very specialized religious-social issue, which is not extended in the present investigation, based on the existence of a megaproject that would be developed in stages according to the life of the pharaohs of the different dynasties. The orientation of the sides of the pyramids with high precision with respect to the north-south, as well as their arrangement according to the constellations, are results of a high degree of knowledge about instruments for measurements and orientation. For the Cheops pyramid, the exploitation of the quarry to obtain more than 2,300,000 blocks of rock, requires basic principles of geology, based on its dimensions in stratification planes and so-called diaclases, generally forming orthogonal fracture patterns. Likewise, the transport of the blocks and their placement constitute basic principles of civil engineering, related to a landscape of forests, where the exploitation of the wood constituted the main element for transport through the roller system and its placement required adequate ramps slope supported on scaffolds constructed of processed wood. The current desert climate covered by sands, contrasts with the climatic conditions that existed during the development of the civilization of the Ancient Empire of Egypt, a Mediterranean climate with abundance of forest landscape. Climate changes have occurred in recent millennia, where civilizations have adapted, with the ingenuity to evolve to better well-bei.

Keywords: Climate change, Ancient Egyptian empire, pyramids, Mediterranean climate, desert, construction

I. INTRODUCCIÓN

El presente artículo constituye el cuarto y final de la investigación realizada sobre desarrollo de la civilización del Antiguo Imperio Egipcio, durante la construcción de las grandes pirámides hace unos 4500 y su relación con las condiciones ambientales y climáticas. Los trabajos publicados, son los siguientes: **[1] EL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA SOCIEDAD DURANTE EL DESARROLLO DE LA CIVILIZACIÓN DEL ANTIGUO EGIPTO, 3000 a 2000 AC**, en el cual se indica que el origen de la civilización egipcia debió contar con un ambiente acorde con su desarrollo, muy distinto a las agrestes condiciones climáticas actuales, alcanzando un máximo apogeo en el llamado Imperio Antiguo, 2000 a 3000 AC; **[2] EL PAISAJE OCULTO DEL DESIERTO DEL SAHARA Y EL CAMBIO CLIMÁTICO. 2500 AC.**, se analizan varias imágenes de Google Earth donde la superficie del desierto, en áreas cubiertas por arenas, muestran una radiografía del subsuelo caracterizado por bandas de colores claros que se asemejan a patrones de drenaje que debieron controlar el paisaje durante el desarrollo de la civilización egipcia, relacionados con amplias áreas de bosques y un clima alternado de verano e invierno; y el tercer trabajo en proceso de publicación se denomina **[3] CONDICIONES TOPOGRÁFICAS AMBIENTALES DURANTE EL DESARROLLO DEL ANTIGUO IMPERIO EGIPCIO. 2500 AC.**, de los antiguos patrones de drenajes que muestran las imágenes Google Earth, a partir de la investigación en [2], se seleccionó una de las cuencas, reflejada en la superficie del desierto, reconstruyendo el relieve topográfico original antes de su ocultación por las arenas, evidenciando alta densidad de drenaje por kilómetro cuadrado (15:1), relacionado con un pasado geológico de periodos de lluvias intensas y continuas. Los patrones de drenaje reflejados en la superficie de arenas, muestra el resultado de procesos de erosión por altas precipitaciones en tiempo geológico muy cercano, relacionado con densa vegetación, la cual perduró a través del tiempo. Durante el desarrollo del antiguo imperio egipcio gran parte del área que ocupa el actual desierto, debió estar cubierta por vegetación, con un clima de inviernos y veranos, influenciado por el clima mediterráneo de la actual Europa. Las condiciones climáticas durante la construcción de las grandes pirámides, véase Figura N° 1, se puede relacionar con un paisaje de amplios bosques, de donde se obtuvo la madera para el transporte, construcción de andamios y colocación de los grandes bloques de roca. También las áreas de cultivos debieron ocupar parte de la meseta de Guiza, con cota superior al valle del río Nilo, así como el agua para el consumo humano debió ser obtenida de fuentes a mayor cota.



Figura 1: Las pirámides en la meseta de Guiza, cercanas a El Cairo (capital de Egipto). **Fuente:** Google Earth

La investigación se basa en una serie de criterios de geología y principios básicos de ingeniería civil, los cuales debieron ser de amplios conocimientos por la civilización del Antiguo Imperio Egipcio. Dichos criterios y conocimiento, en un ambiente de contraste con el actual desierto, permitió sistemas constructivos de fácil implementación, pudiendo clasificar el avance tecnológico hace 4500 AC, como revolucionario repercutiendo en el bienestar de la sociedad. Tal vez el principal misterio de las pirámides no fue como se construyeron, si no, para que se construyeron. Su uso, que sirva como sarcófago del faraón y su reina, se puede asemejar como las grandes iglesias católicas, dentro de las cuales existen entierros de grandes personalidades. La gran cantidad de pirámides pueden considerarse como una forma de consolidar en extensión los principios religiosos para la época. En el presente trabajo se relacionan la construcción de las pirámides con condiciones ambientales muy distintas a las actuales, tal como se describe en la página maravillas-del-mundo [4] que indica un clima cálido y seco, así como niveles del río Nilo de mayor altura que en la actualidad, con la existencia en el pasado de un muelle cercano a las pirámides.

II. VARIACIÓN DEL CAUDAL DEL RIO NILO

R. García **[1]** analiza la información existente de los ríos Nilo (Noreste de África) y Amazona (Suramérica), con respecto a la cuenca y caudal medio, destaca que el río Nilo posee la mitad de la cuenca del río Amazona (7×10^6 km²), con un caudal medio de 100 veces menor. El río Amazona situado en la zona tropical proporciona 1 m³ por cada 31 km², mientras que el río Nilo ubicado en la zona subtropical para 1 m³ se requiere de 1.150 km². En la actualidad la cuenca media a baja del río Nilo,

presenta condiciones desérticas, que ocupan más del 50% del área; si consideramos que dichas áreas para la época del desarrollo del Antiguo Egipto, estaban cubiertas por vegetación, implicaría una mayor precipitación y, en consecuencia, la relación entre el caudal medio y el área de la cuenca, sería menor. Lo anterior aumentaría en forma asintótica el volumen de agua, inundando y ramificando el río en el amplio valle aluvial, estando sumergida hace 5000 años la mayor parte de lo que en la actualidad ocupa la ciudad de El Cairo.

En la página maravillas-del-mundo [4], se describe en forma detallada las distintas estructuras que forman la pirámide Keops, destacándose que al pie de la pirámide del lado este, se encuentra el templo alto, y más hacia el este el templo bajo, el cual tenía un muelle, aparentemente creado en un brazo del río Nilo. Véase Figura N°2. En la misma página se indica lo siguiente “Es extraño pensar que sí, pero hace 4500 años la región no estaba tan seca como lo era, era más bien un clima cálido y seco que permitía el desarrollo de un ecosistema de sabana. Por lo tanto, la vegetación era bastante diferente, el terreno también desde que llegó el Nilo hasta aquí, de ahí la posibilidad de tener un muelle”.

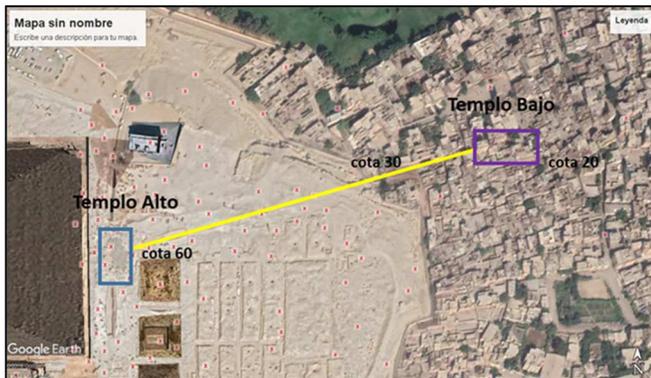


Figura 2: Localización del templo bajo al este de la gran pirámide, a cota 20, donde existía un muelle. **Fuente:** Google Earth

En la actualidad el área se encuentra totalmente poblada, estando el cauce del río Nilo, unos 8 kilómetros al este.

El aumento de caudal medio en la cuenca del río Nilo puede estar relacionada con las condiciones de la cuenca, lo cual trae como consecuencia mayor número de ramificaciones del cauce, así como poca variación en los niveles del río, favoreciendo la construcción del muelle, y facilitando la navegación.

III. ELEMENTOS BÁSICOS DE LA CONSTRUCCIÓN IV.

El uso de la piedra como elemento de construcción, debió evolucionar con el conocimiento del hombre, relacionado con edificaciones que requirieron de mayor resistencia a las condiciones climáticas y como medio de protección, así como poder y supremacía en el área desarrollada. La madera fue el primer elemento de construcción, cuyas técnicas de uso, mediante unión de pórticos, debieron ser mejoradas rápidamente en tiempo, utilizando utensilios para el talle que evolucionaron desde la piedra mediante golpes, al uso de elementos cortantes como el bronce, cuyo conocimiento está reportado desde hace más de 3000 años AC, [5]. Igualmente, para su unión se utilizaron cuerdas de fibras naturales, las cuales debieron ser mejoradas mediante entrelazados para mayor longitud y resistencia.

El primer elemento que el hombre utilizó como defensa fue la piedra, posteriormente su acumulación vertical en forma piramidal le sirvió de separación del terreno, que fue mejorado con el uso de piedras rectangulares para la construcción de paredes verticales, cuyo diseño y estabilidad rápidamente debió ser mejorado mediante el desarrollo de la inteligencia humana. Las piedras rectangulares, fueron obtenidas de las llamadas formaciones geológicas, principalmente de rocas sedimentarias y sus estructuras en forma de capas, las cuales a su vez están afectadas por fracturas verticales, que forman patrones uniformes, conocidos como diaclasas. Las capas se definen como dos planos paralelos que limitan una litología determinada, cuyo espesor es la distancia perpendicular entre dichos planos. Entre los planos que limitan el espesor de las capas y las diaclasas en general perpendiculares a dichos planos, delimitan elementos rectangulares, lo cual se asemeja con el actual bloque de construcción moderno.

Con respecto a la explotación de bloques de rocas graníticas, las diaclasas pueden formar en general patrones ortogonales, donde se pueden destacar planos más continuos que se asemeja a los planos que limitan las capas en las rocas sedimentarias. Dichos patrones de diaclasas delimitan bloques de distinto volumen, desde 0,5 m³ a más de 10 m³.

Para el uso de bloques de rocas en distintas construcciones se requiere de especialistas principalmente relacionados con la geología, los cuales deben evaluar en los sectores de afloramientos la calidad y dimensiones de bloques, analizando espesor de capa y los sistemas de diaclasas. La explotación, se facilitaría por la delimitación del bloque, tanto por los planos que limitan la capa, con poca resistencia en la unión, y las diaclasas, de lo cual dependería su peso,

volumen, la facilidad del traslado y su colocación. Véase Figura N° 3.

Un bloque de unos 100 kilos en peso, puede ser levantado y trasladado por dos hombres, considerando un peso unitario de 2.500 kg/m^3 , se tendrá un volumen de $0,04 \text{ m}^3$ llevado a una forma rectangular, las dimensiones serían del orden de 0,60 metros de longitud x 0,3 metros de ancho x 0,20 metros de alto. Ya tenemos el bloque de construcción, limitando su traslado a la fuerza humana, igualmente estaría limitada la altura de colocación de los bloques al tamaño del hombre. Pero el hombre tenía un elemento natural del cual dependía su defensa, la madera, cuya unión mediante cuerdas, le debió permitir la construcción de las primeras viviendas levantado paredes y techos.

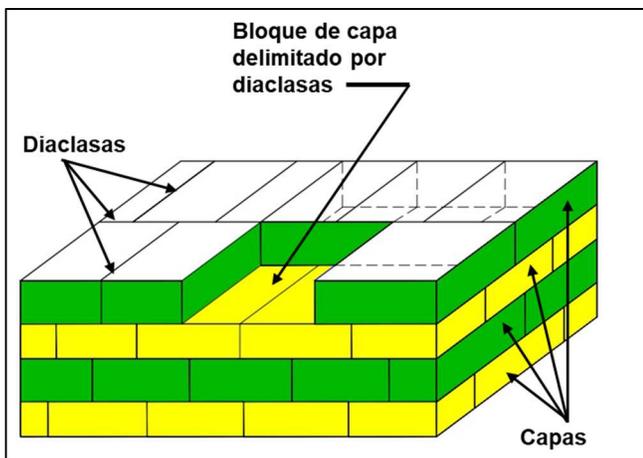


Figura 3: Secuencias de capas horizontales, donde el bloque intacto queda limitado por los planos de diaclasas. **Fuente:** Elaboración propia

Dichas construcciones de madera, debieron ser utilizadas como elementos para obtener mayor altura en los muros de piedras, una especie del actual andamio moderno. Los bloques de un tamaño manejado por la fuerza humana, y elementos de madera permitieron su colocación a alturas importantes. Faltaría solucionar como podemos movilizar los bloques de mayor volumen, para lo cual nos recordamos de Arquímedes de Siracusa, un gran ilustre científico del mundo antiguo de Grecia, hace unos 2200 años del presente, donde indicó " Dadme un punto de apoyo y moveré el mundo", lo cual debió ser conocido varios milenios atrás, durante la evolución del hombre y muy adelantado su principio durante la construcción de las pirámides.

El principio de la palanca, permite el desplazamiento lateral local de bloques de gran tamaño, faltaría saber cómo solucionamos el desplazamiento horizontal. La rueda, un invento que ha sido ubicado de 3.500 a 3.100

AC en Eslovenia, de acuerdo con algunas investigaciones [6], pudo ser usado para transporte, dependiendo del relieve topográfico, un área plana o de poca pendiente. La rueda facilita el traslado tanto de personas como mercancías, en cambio sí vamos a desarrollo del imperio Inca, con un relieve montañoso abrupto y con altas pendientes, la rueda no tenía ningún sentido, donde la movilidad se realizaba caminando o mediante animales de carga como las llamas.

Para la época de su inicio, un transporte construido con madera y ruedas, podría transportar carga de muy bajo peso, pudiendo ser limitante su uso para bloques de varias toneladas. Un medio de transporte que debió ser conocido por nuestros antepasados en la edad de piedra, lo constituye el rodillo ya que todos los seres humanos conocen el efecto de tratar mantenerse en equilibrio sobre un tronco y su rápido desplazamiento horizontal.

Lo que debió facilitar el desplazamiento por largas distancia de los pesados bloques sería el sistema de rodillo, el cual debió ser implementado mediante troncos de árboles, aproximadamente con uniformidad de su diámetro. Según el principio de física elemental es que el peso de un cuerpo se descompone de acuerdo al plano de apoyo, si el plano está horizontal y consideramos que la superficie de apoyo son troncos, con fricción muy baja al desplazamiento horizontal, el cuerpo por pesado que sea puede ser desplazado con muy poca fuerza horizontal. Es importante destacar de acuerdo con la amplia bibliografía existente sobre las propiedades mecánicas de la madera [7] podemos resumir que especies ampliamente extendidas en Europa como: haya, abedul, cerezo europeo, arce, castaño, fresno etc., su resistencia a la compresión sin confinar varía entre 450 y 600 kgf/cm^2 (45.000 y 60.000 kPa), así como módulo de elasticidad en general entre 100.000 y 130.000 kgf/cm^2 . Dichos parámetros dan valores de resistencias mucho mayores que las solicitaciones a efectos de altas carga distribuidas sobre una cama de troncos. Si consideramos un bloque de 20 toneladas, con un área de apoyo de $2 \times 2 \text{ m.}$, sobre una cama de troncos de 20 centímetros de diámetro, la carga se distribuye sobre 10 troncos y a lo largo de 2 metros y consideramos que el apoyo en el tronco sea 0,5 centímetros. Resulta un área de contacto de 100 cm^2 , con una carga distribuida e instantánea de 200 kg/cm^2 , inferior al promedio de los 500 kg/cm^2 .

V. CONDICIONES AMBIENTALES

Para la época del Antiguo Imperio de Egipto, la construcción de las grandes pirámides debió contar con un clima muy distinto al paisaje desértico actual, donde el ambiente se debió asemejar al actual mediterráneo, con época de lluvia y calor, según R. García [3]. Dicho ambiente, se pudo caracterizar por un paisaje de bosques, los cuales a medida que avanzaba la civilización, la amplia meseta de Guiza debió ser objeto de vastas deforestaciones, en cuyos terrenos se desarrolló el gran imperio del Antiguo Egipto.

La meseta de Guiza, estaba limitada al oeste por un relieve de montañas de pendiente baja, que se caracterizó previo a la cubierta por las arenas de numerosas cuencas, con patrones de drenaje irregular de alta densidad de cauces, [3]. Debido al ambiente mediterráneo, toda el área pudo estar cubierta por una vegetación con gran variedad de especies, similares a la existente actualmente en Europa, que debieron ser clasificadas y utilizadas para las distintas actividades, como viviendas, elementos de construcción y combustible.

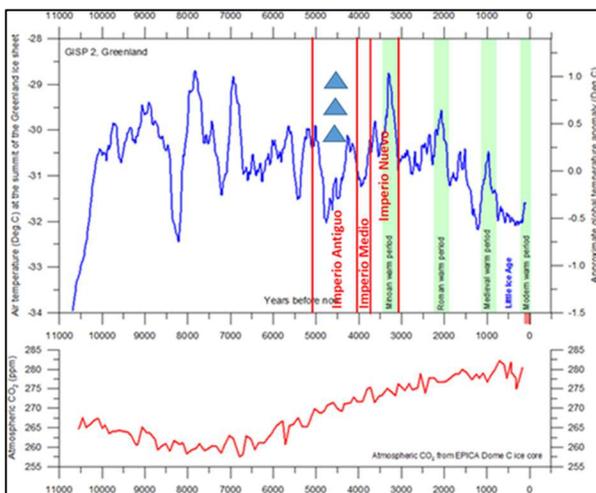


Figura 4: En el gráfico de Richard Alley, “reconstrucción de Temperatura de 10700 años de Ants del Presente, según el Glaciar GISP2, en Groenlandia”, se encuentra delimitado la evolución del Imperio Egipcio

Las montañas cercanas a la meseta, debieron contar con agua permanente, que mediante tomas o derivaciones y conducciones por gravedad debieron suministrar el líquido a los sitios poblados y a las construcciones en la meseta de Guiza, cuya superficie se encuentra a más de 40 metros del nivel actual del cauce del río Nilo. Es importante destacar que de acuerdo a R. García [1], las mayores obras de

canalizaciones en el río Nilo se realizaron después del año 1800 AC, pudiendo estar relacionado con la disminución de las áreas verdes en la cuenca, descenso en la lluvia y del caudal medio del río. De las investigaciones realizadas por Richard Alley [8] en Groenlandia, sobre una longitud de 2 millas de núcleos de hielo, cuyos resultados se extienden por 11.000 años del presente, se encuentra seleccionado en la Figura N°4, la variación de la temperatura global a partir de 5.000 años desde el presente. Durante el desarrollo del Imperio Egipcio, se destaca en el gráfico de R. Alley que durante el Imperio Antiguo se encontraba con una temperatura por debajo de la media del milenio lo cual debió favorecer las condiciones de trabajo y el rendimiento durante la construcción de las grandes obras.

VI. LA CONSTRUCCIÓN DE LAS PIRÁMIDES

La construcción de grandes edificaciones por distintas civilizaciones ha sido una forma de dejar evidencia al mundo futuro de su poderío y bienestar. Las obras se convierten en el centro de generación de fuente de trabajo, trayendo como resultado la expansión económica en otras actividades como la alimentación relacionada con la agricultura y la cría de animales.

Él porque de las pirámides constituye un tema religioso-social muy especializado, del cual no se amplía en la presente investigación, partiendo de la existencia de un megaproyecto que se desarrollara por etapas de acuerdo a la vida de los faraones de las distintas dinastías. La orientación de los lados –sur, así como su disposición de acuerdo con las constelaciones, son resultados de alto grado de conocimiento sobre instrumentos para mediciones y orientación.

La pirámide de Keops la de mayor altura, [9], tenía originalmente 146.60 metros, con una base de 230 metros por lado, pero su altura actual es de solo 138 metros. Posee 201 capas de bloques de roca de una altura media de 0,70 metros, estimándose 2,3 millones de bloques. De acuerdo con la relación volumen/número de bloque, daría un promedio de 1,6 m³, lo cual corresponde a un peso promedio de unas 4 toneladas. Las dimensiones de los bloques de acuerdo con el inmenso material fotográfico de internet, se pueden estimar de 1,5 metros de ancho por 1,5 metros de largo y 0,70 de alto.

A lo anterior hay que considerar los bloques prismáticos del revestimiento de caliza pulida, estimado en unos 25.000 bloques, cuyo peso de acuerdo a Álvarez L.J. [10] son de 16 toneladas, resultando un volumen de 6,4 m³, pudiendo tener dimensiones de 3 metros de largo, 1,50 metros de alto y 1,4 de profundidad.

Aproximadamente los bloques de revestimiento corresponderían a dos bloques del cuerpo de la pirámide.

La construcción de las pirámides dependió del transporte de los grandes bloques, mencionándose por distintos autores el uso de trineos, basados en el libro de Schulz y Saidel [11], que toman como ejemplo la pintura de la tumba de Dyehutihotep, XI dinastía, arrastrada por 4 filas de trabajadores que suman un total de 172 hombres, véase Figura N° 5. La estatua de unos 6 metros de alto está apoyada en un trineo, cuyas dimensiones en comparación de las figuras egipcias, se pueden estimar de unos 4 metros de longitud y un ancho similar, con un área de apoyo de unos 16 m². El peso de la estatua podría estimarse de acuerdo con su altura, en unas 60 toneladas. Llama la atención que la base de la estatua posee una dimensión similar al largo del trineo, y aunque no se ve la dimensión de profundidad, el trineo de madera podría estar construido con troncos sucesivos en forma longitudinal o separados formando un armazón, en ambos casos, el apoyo no es uniforme, aunque se indica una figura regando la superficie de apoyo, para obtener baja fricción en el desplazamiento. Si consideramos la superficie horizontal y que cada uno de los 172 hombres, aplique una fuerza de 60 kilos, se obtendría una fuerza total de unos 10.000 kilos, que comparado con el peso de 60.000 kilo del monumento, el desplazamiento dependería del valor de roce entre el trineo y el suelo, el cual debería ser menor a 0,2. Dicho valor podría estar relacionado con la necesidad de humedecer la superficie de apoyo, pudiendo originarse deformaciones, que dificultarían su traslado.

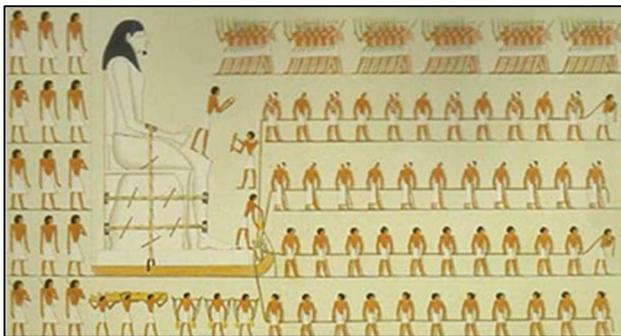


Figura 5: Pintura de la tumba de Dyehutihotep, XI dinastía del libro de Schulz de Saidel, donde la estatua del faraón es arrastrada por 4 filas de trabajadores que suman un total de 172 hombres

El transporte de los millones de bloques debió tener técnicas acordes con las obras, que debieron rápidamente optimizarse en esquemas de construcción. La forma más antigua del ser humano de desplazarse

sin caminar, es sobre un tronco, donde en su giro la fricción al rodamiento es muy baja.

El desplazamiento de los bloques se debió facilitar con el empleo de un sistema de rodillos de madera sobre el que se apoyaría el bloque, para lo cual el ángulo de fricción se considera 0°, así la fuerza horizontal para el movimiento dependería de la pendiente a vencer. Los troncos que actuaban como rodillo, deberían estar apoyados sobre una superficie adecuadamente conformada y resistente, y los troncos posiblemente agrupados en secciones separadas, cuyo desplazamiento horizontal permitiera acceder a la siguiente sección. Para una pendiente del 5%, un bloque de 4 toneladas, la componente horizontal, sería de 174 kilos, y para uno de 16 toneladas, resulta una fuerza horizontal de 700 kilos, (multiplicando el peso x el seno de 2,5°). Dicha fuerza fácilmente puede ser aplicada mediante amarres por un grupo de hombres, que considerando una fuerza horizontal por hombre de 60 kg, tenemos respectivamente para los ejemplos anteriores 3 y 10 hombres.

El desnivel entre capa y capa de rocas es de unos 70 centímetros y en el caso de los bloques de revestimiento, cubrirían 2 capas de las rocas. En la Figura N°6, del ascenso de los bloques mediante rampas, que tendrían que tener una plataforma horizontal a la altura de la colocación de las capas de bloques, de aproximadamente cada 0,70 metros de altura. Las rampas estarían apoyadas en una especie de andamios de altura variable, apoyados a medida que asciende, en los escalones de la pirámide. Dichas rampas podrían tener forma de zigzag, estando construidas varias rampas por cada lado de la pirámide. En la Figura N° 6, se muestra la longitud necesaria para ascender en zigzag cada 3 capas de bloques, ocupando una longitud de 60 metros.

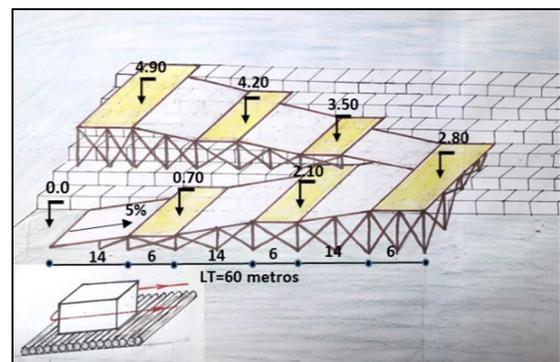


Figura 6: Esquema de rampas de ascenso en forma de zigzag, requiriendo para salvar el desnivel de la altura del bloque una longitud aproximada de 14 metros. **Fuente:** Elaboración propia

Una vez llegado al tope de la pirámide, se comenzaría la colocación de los bloques de revestimiento, desde arriba hacia abajo, desarmando la totalidad del andamiaje a medida que avanzaba la colocación del revestimiento. Los bloques del revestimiento debieron ser limpiados mediante agua, que debió ser transportada con baldes ascendiendo por las rampas. Los bloques transportados una vez alcanzado cada nivel, deberían ser colocados desde el centro de la sección hacia el perímetro, utilizando el sistema de rodillo como transporte. Así mismo de forma tal de disminuir el tiempo de construcción deberían existir numerosas rampas en el perímetro. A medida que asciende la construcción, las dimensiones del perímetro de la pirámide disminuyen, al igual que el número de rampas, las cuales tendrían que ir aumentando su pendiente. Los andamios de madera debieron construirse con troncos de árboles colocados verticales y amarrados horizontalmente con troncos o madera procesada mediante corte.

La pirámide durante su construcción debió estar circundada por un gran número de andamios que requirió la explotación de importantes áreas de bosques. De lo anterior se concluye que la madera formó parte de los andamios de ascenso que se iban apoyando en los sectores inferiores construidos y de los sistemas de rodillos para el desplazamiento horizontal de los bloques.

Una vez culminada la obra, dichos materiales utilizados para la construcción debieron ser desmantelados, tratados y almacenados para las siguientes obras.

VII. ESQUEMA INTERNO DE LA PIRÁMIDE

Aparentemente la finalidad de las pirámides era servir como sarcófago al faraón de turno, lo cual se puede asemejar a las impresionantes iglesias católicas, dentro de las cuales existen entierros de grandes personalidades. La gran cantidad de pirámides pueden considerarse como una forma de consolidar en extensión los principios religiosos para la época.

Para el caso de la pirámide de Keops, [12], la distribución interna se muestra en la Figura N°7, debiendo haber existido planos muy detallados de forma tal de ir implementando las obras previstas a medida que avanzaba la construcción de la pirámide, de abajo hacia arriba. En las distintas cámaras se mencionan la presencia de rocas de granitos, muy distinta a los bloques de caliza. Las canteras para dichos bloques de granito, se encuentran lejos del área, los cuales debieron ser transportados por barcos, aprovechando la ramificación del río Nilo bordeando la meseta de Guiza que facilitó el transporte y el acceso.

Por debajo de la superficie de apoyo de la pirámide, se indica una galería inclinada de unos 100 metros de largo que llega a una cámara inferior y a un pozo. Estas estructuras debieron ser excavadas previas a la construcción de la pirámide; también se indica una galería casi vertical, en parte excavada a través de los bloques de caliza, una vez avanzada la construcción de la pirámide. Se destaca una gran galería central inclinada, con acceso superior hacia la habitación del rey y el acceso inferior horizontal hacia la cámara de la reina. Existen ductos inclinados con salida hacia la superficie, cuya orientación aparentemente están relacionados con las estrellas.

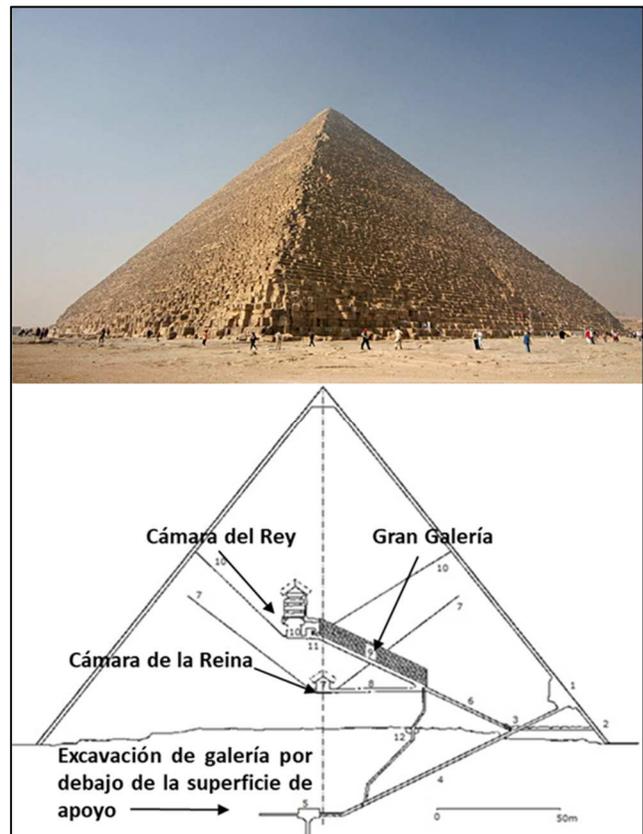


Figura 7: La gran pirámide de Keops, distribución interna [12]. Fuente: Google Earth

La distribución de galerías y cámaras dentro de la pirámide, constituyen obras que requieren de gran control topográfico, debiendo contar con equipos que permitan durante su construcción su posicionamiento preciso, así como el control vertical y horizontal.

La galería por debajo de la superficie de apoyo de la pirámide, se encuentra a unos 35 metros de profundidad, seguida por un pozo vertical. La cota de

apoyo de la pirámide de acuerdo con mediciones en las imágenes de Google Earth, en promedio corresponde a cota 60, por lo tanto, la cámara inferior tendrá cota 35, ubicada por encima del nivel del río Nilo. Es posible que esta galería y cámaras inferiores así con la galería vertical que desciende desde la galería central, puede estar relacionado con un sistema de drenaje de las cámaras principales.

Si consideramos que el clima durante el desarrollo del antiguo imperio egipcio era de tipo mediterráneo, el control del drenaje debió ser considerado tanto durante la construcción como en el funcionamiento de las pirámides. Principalmente durante la construcción, la superficie plana truncada de la pirámide, permitía la acumulación e infiltración del agua a través de los bloques, lo cual debió ser controlado hacia las cámaras, principalmente por las galerías inferiores, infiltrándose hacia cotas inferiores.

VIII. EXPLOTACIÓN DE LA CANTERA

Analizando las imágenes de Google Earth, al oeste de las grandes pirámides se destaca un amplio sector que debió ser explotado como cantera, destacándose un frente de excavación por debajo del relieve topográfico de la meseta, donde las capas se encuentran en posición casi horizontal, con un primer banco de unos 30 metros de desnivel, Véase Figura N° 8. El sitio de la cantera, se encuentra a una distancia geométrica de unos 1.000 metros al oeste de la pirámide Keops; posee un nivel original de explotación a cota 100, siendo la cota inferior del último banco la cota 70, destacándose que la base de la pirámide se encuentra a cota 60. Lo anterior facilitó, el transporte de los bloques en sentido de la pendiente, hasta el pie de la pirámide Keops. Considerando una longitud de unos 1.200 metros, por 200 metros de ancho y 30 de espesor, el volumen resultante es mayor a 7,2 millones de metros cúbicos.

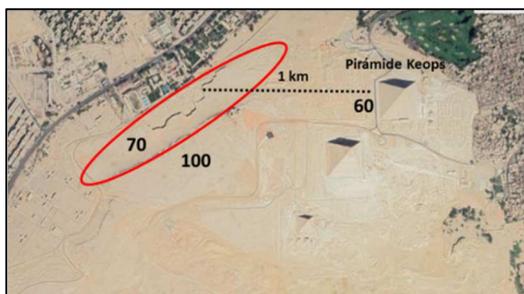


Figura 8: Localización de la cantera principal para extraer los bloques de roca para la construcción de las pirámides.

Fuente: Google Earth

La secuencia del frente oeste de la amplia cantera para la construcción de las pirámides, se puede correlacionar con las excavaciones realizadas del lado opuesto, al este, para la esfinge de unos 20 metros de alto, tal como se observa en la Figura N°9. En las paredes casi verticales que limitan el área de excavación de la esfinge, se destaca la secuencia de rocas sedimentarias, caracterizadas por estratos o capas de distintas litologías, variando calizas, calizas arenosas, areniscas calcáreas, limolitas y en menor proporción lutitas. La secuencia presenta un suave buzamiento hacia el sur, destacando los sistemas de diaclasas, que en conjunto con los planos que delimitan la capa, determinan el volumen de los bloques. Aunque no se descarta, el talle de los bloques, gran parte de ellos, son el resultado del sistema de fractura en conjunto del plano de estratificación, pudiendo estimar de observaciones en distintas fotos públicas, que por el tamaño de los bloques que limitan las caras de las pirámides, la frecuencia de fracturas o diaclasas, puede ser variable entre 1:1-1,5 (una diaclasa cada metro a metro y medio).

La explotación de la cantera, por la posición de los estratos horizontales, se debió realizar en amplios bancos, de forma tal de aprovechar el espesor de las capas casi constante y mantener el nivel de accenso en la construcción de la pirámide. Es importante destacar que los bloques colocados deben conservar un nivel horizontal, de forma tal de controlar la geometría de la pirámide. La superficie original de apoyo de la pirámide se encuentra controlada por una suave pendiente debido al buzamiento de las capas, cuya conformación a un nivel de apoyo horizontal debió requerir la colocación de bloques de roca en el lado de la inclinación del terreno, hasta alcanzar la cota del lado opuesto. Figura N° 9.



Figura 9: Excavación que delimita la Esfinge, donde se observa la secuencia de las capas y el buzamiento suave.

Fuente: Gogle Earth

Los bloques de caliza debieron ser separados, mediante cuñas de madera, las cuales eran introducidas en las diaclasas o grietas existentes a golpes de martillo. Posteriormente, su forma final se debió conformar con golpes de martillo, cuya masa fue obtenida de rocas graníticas de mayor dureza, con la cual fabricaron los elementos de percusión, similares a los martillos actuales. Dicho martillo de gran dureza, facilitó el talle y conformación de las rocas de menor dureza.

IX. HERRAMIENTAS DE CORTE

Es importante destacar en el desarrollo del imperio antiguo egipcio, se localiza en la llamada edad de bronce, una aleación de cobre y estaño, de gran dureza, que permitía el talle sobre superficies de roca, que en conjunto con herramientas de percusión, permitieron las descripciones en paredes.

Álvarez L.J. [5], describe que los egipcios desarrollaron herramientas de corte altamente sofisticadas, con precisiones similares a las actuales, incluyendo el uso de trépanos para aberturas, que debieron contar con brocas cuya composición se encuentra en investigación. El uso del bronce (aleación de cobre con estaño), posee una dureza que, implementada a una sierra dentada, facilita el corte de la madera y rocas blandas como la caliza. También llama la atención en los prismas de revestimiento de caliza que cubre la pirámide, tal como lo indica Álvarez "ópticamente perfectos", debieron contar con serruchos capaces de mantener las superficies paralelas, indicando un total de 25.000 bloques, con una superficie por bloque de 20 m² y un peso de 16 toneladas.

Con respecto al talle de rocas graníticas el sistema de sierra debió combinarse con elementos abrasivos los cuales, de acuerdo con Álvarez, se evidencia en los cortes de los sarcófagos.

X. EJECUCIÓN DE LA OBRA

Para la ejecución de las pirámides debieron contar con un proyecto realizado en forma detallada, tomando en cuenta los recursos naturales existente como fueron la cantera para obtener la piedra y la explotación de los bosques para la madera, seleccionando y procesando en forma adecuada para dichas construcciones. A lo anterior se le sumaba el recurso humano, debiendo existir para la ejecución de la obra, una pirámide de mando, comenzando con un coordinador y control del proyecto, el cual tendría bajo su mando un número importante de supervisores en los distintos frentes de trabajo, que en general se pueden enumerar: 1) Mineros, para la explotación de la cantera, 2) Madereros, explotación del bosque, 3) Carpinteros, elaboración de la madera para sistemas de rodillo y

andamios, 4) Obreros especializados para el transporte de los bloques y colocación, 5) Control geométrico de campo, lo que hoy serían los topógrafos. Sobre el control geométrico se destaca la alta precisión en la orientación de los lados y en los ángulos de la base de inicio, así como mantener la geometría con gran precisión alcanzada a más de 140 metros de la superficie de apoyo.

A lo anterior se le suma la alimentación y viviendas para el gran número de habitantes, extendiéndose con el paso de los siglos a toda la meseta de Guiza. La gran extensión de la meseta requirió del suministro de agua, tanto para consumo humano como riego y labores de trabajo, cuyos importantes caudales debería provenir de cotas superiores, de los drenajes occidentales a la meseta, independiente del río Nilo.

Tomando como base la pirámide de Keops, el control de la meseta por la presencia de estratos rocosos con ligera inclinación hacia el sur, requirió previamente nivelar el área de apoyo de la pirámide, alternada lateralmente con la primera capa de bloques la presencia de los estratos del basamento rocoso. Por lo anterior en la gran cantidad de fotos en las imágenes de Google Earth, se destacan estratos originales principalmente hacia los bordes del lado norte, contrario al sentido del buzamiento, en donde se requirió la colocación de bloques de nivelación del lado sur. En forma simultánea se procedió a la excavación de una galería inferior en la secuencia de rocas sedimentarias, similares a las capas que conforman la esfinge. Para la excavación de dicha galería debieron utilizarse utensilios de corte y a percusión, avanzando en forma inclinada por unos 100 metros, llegando a unos 35 metros de profundidad, donde la galería se pone horizontal, indicando la presencia de un pozo vertical, posiblemente para efectos del drenaje.

Una vez en proceso de explotación de la cantera, se requirió construir las vías de transporte de los bloques de roca, así como los sistemas a base de rodillos, para los cuales debieron ser seleccionados árboles de diámetro similar y de gran dureza. Para el transporte se debió contar con una especie de calzada de superficie dura como vía expresa, sobre la cual se apoyarían los troncos redondeados, que permitiera su giro para el desplazamiento horizontal, posiblemente limitando su recorrido a un número limitado de troncos, procedidos de otro número similar. El ancho de la calzada sería algo mayor al ancho de los bloques, comportándose como vías expresas de transporte.

Posteriormente se fueron construyendo sobre andamios, las rampas de acceso alrededor de la pirámide, apoyadas en el perímetro escalonado, donde el número de rampas pudo comenzar con cuatro o más por cada lado, para un total no menor a 16 sitios de

trabajo. La explotación de la cantera en forma horizontal, permitió establecer varios sitios de trabajo, facilitando el acarreo de los bloques debido a la pendiente, donde la cota de explotación comenzó en la 100 y la base de la pirámide se encuentra a cota 60.

El número de bloques de roca que conforma la pirámide es del orden de 2.400.000 y su tiempo de construcción [4] [9], varió entre 20 a 30 años. Considerando una media de 24 años, se tendría que colocar 100.000 bloques al año, o sea unos 280 por día, número muy alto por un solo frente, pero que resulta manejable cuando consideramos 16 o más frentes de trabajo, resultando no menos de 17 bloques al día/frente.

XI. CONCLUSIONES

El desarrollo del imperio antiguo egipcio, debió contar con condiciones ambientales muy favorables durante varios siglos, clima tipo mediterráneo y densa vegetación, que permitieron la construcción de las grandes obras como las pirámides, las cuales debieron alcanzar una alta tecnología, basada en el uso de la madera para el transporte y colocación de los grandes bloques de roca. No es posible imaginar las grandes construcciones en la meseta de Guiza sin extensos bosques y condiciones climáticas de contraste con los actuales paisajes desérticos.

Los avances tecnológicos alcanzados en la época del Imperio Antiguo Egipcio, sobre mediciones geométricas y astronomía, requirió instrumentos de precisión que permitieron llevar a cabo el control durante la construcción de las pirámides de acuerdo con un proyecto detalladamente concebido. Durante el largo tiempo de construcción de las pirámides, las iniciativas sobre inventos para facilitar y optimizar su construcción, la obtención y transporte de los bloques, así como el sistema de rampas y andamios, debió ir mejorando a medida que avanzaba la obra.

De acuerdo con R. García [3], debajo de la actual superficie de arena, se refleja un denso patrón de drenaje, de una época climática que se extendió durante el desarrollo del Imperio Antiguo, siendo fuente para el abastecimiento de agua en la meseta de Guiza con cota muy superior respecto al río Nilo, captadas mediante tomas y conducidas a base de canales. La disminución de las fuentes de agua, después de la construcción de las pirámides, se relacionan con grandes obras de canalizaciones desde el río Nilo hacia las áreas

productoras, realizadas durante el siglo XVIII AC, también como la disminución del caudal medio del río Nilo que dio lugar en el ancho valle aluvial a amplias extensiones de terrazas, que han servido para el desarrollo de las grandes ciudades actuales de Egipto. La evolución de los egipcios desde la meseta de Guiza con las impactantes pirámides, a la amplia extensión de la moderna ciudad de El Cairo, localizada en el ancho valle aluvial del río Nilo, es producto del activo cambio climático. Las condiciones ambientales que predominaron durante el desarrollo del imperio del antiguo egipcio, debieron ir cambiando con el paso de los siglos, a medida que disminuían las fuentes de agua, obligando a buscar otros terrenos a cotas inferiores hacia las planicies del río Nilo, como resultado de la disminución progresiva del caudal del río, con facilidades de abastecimiento de agua y áreas de cultivo.

REFERENCIAS

- [1] R. Garcia R, (2019). "EL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA SOCIEDAD DURANTE EL DESARROLLO DE LA CIVILIZACIÓN DEL ANTIGUO EGIPTO, 3000 A 2000 AC. Revista Tekhné. Vol.22, Num. 2. 080-090
- [2] R. Garcia R, (2019). "EL PAISAJE OCULTO DEL DESIERTO DEL SAHARA Y EL CAMBIO CLIMÁTICO. 2500 AC., Revista Tekhné N° 22.4. Semestre Septiembre 2019. ISSN 1316-3939.
- [3] R. García R, (2019) documento revisión "CONDICIONES TOPOGRÁFICAS AMBIENTALES DURANTE EL DESARROLLO DEL ANTIGUO IMPERIO EGIPCIO. 2500 AC """. Revista Tekhné Facultad de Ingeniería, UCAB.
- [4] [La pirámide de Keops – Monumentos. https://www.maravillas-del-mundo.com](https://www.maravillas-del-mundo.com) > <https://reydekish.com/2014/12/13/la-gran-piramide-de-giza/>
- [5] Fullola, Josep M^a; Nadal, Jordi (2005). «Introducción a la prehistoria. La evolución de la cultura humana». *Barcelona* (primera edición) (Ed. UOC). ISBN 84-9788-153-2. <https://es.wikipedia.org/wiki/Rueda>
- [6] Correal E., Vilches C. (2017), Propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Fraxinus excelsior*. 7cfe.congresoforestal.es/sites/default/files/comunicaciones/634.pdf
- [7] http://maderasbarcemur.com/fichas_frondosasboreales.pdf
- [8] Alley Richard B. (2000). "The Two-Mile Time Machine: Ice Cores, Abrupt Climate Change, And Our Future". Princeton University Press. 229 P.
- [9] https://es.wikipedia.org/wiki/Gran_Pir%C3%A1mide_de_Guiz.
- [10] Álvarez López José (1968) "El Enigma De Las Pirámides / the Enigma of the Pyramids" Editorial Kier
- [11] Schulz, Regine y Saidel (2000) "EGIPTO, El Mundo de los Faraones". Editorial HF ULLMANN; 2ª ed. edición (2012).
- [12] <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/gran-piramide-de-keops>.