



**Escuela Técnica
Superior de Arquitectura**

MIATD

MASTER UNIVERSITARIO EN INNOVACIÓN EN ARQUITECTURA:

TECNOLOGÍA Y DISEÑO

MÁSTER DE INNOVACIÓN EN ARQUITECTURA: TECNOLOGÍA Y DISEÑO. CURSO (2022-2023)

Trabajo Fin de Máster

PARAMETRIZACIÓN Y ALGORITMOS GENÉTICOS COMO MÉTODO DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS LIGERAS:
APROXIMACIÓN AL CASO DE COBERTURA DE YACIMIENTOS ARQUEOLÓGICOS

Trabajo realizado por: Neli Chyzheuskaya

Trabajo dirigido por: Fernando Díaz Moreno
Margarita Cámara Pérez

AGRADECIMIENTOS

A mis tutores Fernando Díaz Moreno y Margarita Cámara Pérez por motivarme y ayudarme iniciar este trabajo, por su guía y sobre todo paciencia y dedicación.

A Juan Carlos Gómez de Cózar, el coordinador de este Máster, por el desarrollo del interés sobre el tema del trabajo y sus conocimientos compartidos.

A Ignacio Rodríguez Temiño, el director del Conjunto Arqueológico de Carmona, por haberme aportado los medios y información necesarios para la realización de este trabajo.

A mis seres queridos por todo su apoyo emocional, su esfuerzo y todos sus recursos que habeis dedicado para darme la oportunidad de proseguir mi educación.

ÍNDICE

ÍNDICE

RESUMEN

1. ANTECEDENTES E INTERES DEL TRABAJO
 - 1.1 Diseño paramétrico y algoritmos genéticos
 - 1.2 Problemática de protección de los yacimientos arqueológicos
2. ESTADO DE CUESTIÓN
 - 2.1 Aplicación del diseño paramétrico al proceso de diseño
 - 2.2 Aplicación de los algoritmos genéticos al proceso de diseño
 - 2.3 Aplicación del diseño paramétrico y algoritmos genético al proceso de diseño de cubiertas de protección de yacimientos arqueológicos
 - 2.4 Cubiertas como protección de yacimientos arqueológicos y su eficiencia
3. OBJETIVOS
4. METODOLOGÍA
5. FASE I . CUBIERTAS DE PROTECCIÓN DE YACIMIENTOS ARQUEOLÓGICOS DE LA REGIÓN MEDITERRÁNEA
 - 5.1 Historia de cubiertas de protección de yacimientos arqueológicos
 - 5.2 Clasificación de las cubiertas de yacimientos arqueológicos
 - 5.3 Criterios de diseño de cubiertas de protección
 - 5.4 Visión general de las cubiertas de yacimientos de protección arqueológicos de la región mediterránea con especial atención sobre el ámbito de la península ibérica
6. FASE II. DEFINICIÓN GEOMÉTRICA DE LA CUBIERTA

- 6.1 Área de intervención: Tumba de Postumio y Tumba de las Tres Puertas en la Necrópolis de Carmona
- 6.2 Proceso de alteración
- 6.3 Estudio visual del terreno. Modelo del contorno
- 6.4 Búsqueda de geometría de la cubierta
- 6.5 Definición y modelización paramétrica de la cubierta
- 6.6 Análisis medioambiental y optimización
- 6.7 Optimización de la superficie de la cubierta

7. FASE III. DEFINICIÓN ESTRUCTURAL Y IMPORTACIÓN DEL MODELO PARAMÉTRICO AL ENTORNO BIM

- 7.1 Definición estructural
- 7.2 Importación del modelo de la estructura al entorno BIM
- 7.3 Discusión de resultados

8. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DEL TRABAJO

- 8.1 Conclusiones
- 8.2 Propuestas de líneas del trabajo para el futuro

REFERENCIAS

RESUMEN

Durante el proceso de la excavación arqueológica los bienes arqueológicos se ven sometidos a un cambio drástico de las condiciones ambientales, lo que conlleva su deterioro. El objetivo principal de la excavación arqueológica se torna entonces en adoptar las medidas necesarias de protección de los restos, como la aplicación de sistemas de cubrición. Sin embargo, un número considerable de las cubiertas aplicadas no proporcionan la protección adecuada y en algunos casos incluso exacerba los procesos de deterioro del yacimiento, modificando las condiciones climáticas bajo la cubierta. En este trabajo se desarrolla una propuesta de cobertura de protección de yacimientos arqueológicos, aplicada al caso concreto de las Tumbas de Postumio y de las Tres Puertas del conjunto arqueológico de Carmona. La propuesta se basa en la aplicación de estructuras ligeras y de rápido montaje y se centra en la búsqueda de una geometría de la cubierta que proporcione una protección eficaz contra la radiación solar y lluvia mediante el uso de diseño paramétrico, herramientas de análisis ambiental y algoritmos genéticos. Además, este trabajo emplea la importación al entorno BIM (Building Information Modeling) del modelo paramétrico desarrollado para la presentación del proyecto. Los resultados obtenidos proporciona una mejor comprensión del contexto en el que se encuentra el yacimiento y demuestra una mayor eficiencia en la protección de restos arqueológicos frente al diseño tradicional de una cubierta.

Palabras clave: Coberturas arqueológicas, Diseño paramétrico, Algoritmo genético, Optimización ambiental.

ABSTRACT

During the process of archaeological excavation the archaeological assets are subjected to a drastic change of the environmental conditions, which leads to its deterioration. The main objective of the archaeological excavations becomes then adopting the necessary measures to protect the remains, like the application of covering systems. However, a considerable amount of the shelters applied do not provide the adequate protection, modifying the environmental conditions below the cover. In this work a proposal of protecting cover for archeological sites is developed, applied to the specific case of the Postumius Tomb and Tomb of the Three Gates at the archaeological site of Carmona. The proposal is based in the application of lightweight, quick-assembly structures and it focuses on the search for a geometry of the cover that provides an efficient protection against solar radiation and rain through the usage of parametric desing, environmental analysis tools and genetic algorithms. Moreover, this work uses the import to the BIM environment (Building Information Modeling) of the developed model for the presentation of the project. The results obtained provide a better understanding of the context in which the site is located and demonstrates a higher efficiency in the protection of the archaeological remains in comparison with tradicional means of cover desing.

Keywords: Archaeological shelter, Parametric design, Genetic algorithm, Environmental Optimization.

01

ANTECEDENTES E INTERES DEL TRABAJO

1.3 Diseño paramétrico y algortmos genéticos

En las últimas décadas el diseño arquitectónico ha sufrido grandes cambios debido al desarrollo tecnológico. La arquitectura ha pasado de un diseño basado en herramientas manuales, como lápiz y papel, a un diseño digital con herramientas CAD y BIM. Sin embargo, el proceso de diseño todavía requiere mucho trabajo manual. Normalmente el diseñador desarrolla un proyecto intuitivamente, basandose en su experiencia y creatividad, mientras que el uso de ordenador le ayuda con la presentación y el análisis, pero no es esencial en la búsqueda de una solución (Gradišar et al. 2022).

La necesidad de reducir el coste del proyecto (Atabay 2009; Rodríguez Hernández et al. 2021) y el tiempo de ideación incentivan la aparición nuevas estrategias de diseño arquitectónico como el diseño paramétrico y el diseño generativo (Quispe y Ulloa 2021). En este caso el enfoque creativo se ve íntegramente condicionado por la necesidad de determinar el problema a abordar en la generación del diseño. En cuanto el problema esta definido puede ser analizado a traves del modelaje paramétrico y el

uso de algoritmos para generar automáticamente múltiples soluciones de entre las que el diseñador selecciona la solución óptima en base a su criterio (Caldas y Norford 2002).

El uso del diseño paramétrico y algoritmos genéticos aumentan la productividad y optimiza el manejo del tiempo. Además permite ampliar los límites de diseño, evaluando soluciones más complejas y adoptando técnicas de fabricación avanzadas (Picon 2011). Aplicando estos métodos de optimización los diseñadores pueden reducir los gastos y el tiempo de diseño y así producir mejores soluciones (Esmailian Toussi 2020)

Por consiguiente, su aplicación proporciona una ventaja al proceso de diseño, sobre todo en los proyectos cuya realización se ve condicionada por márgenes temporales cortos (Terzidis 2006) y presupuestos muy controlados, como en caso de este trabajo el de cubiertas de protección de yacimientos arqueológicos, en la realización de las cuales los factores temporal y económico son particularmente relevantes (Pedelì y Pulga 2014).

1.4 Problemática de protección de los yacimientos arqueológicos

La protección de los yacimientos siempre ha sido una cuestión prioritaria de las investigaciones arqueológicas y al mismo tiempo uno de los problemas más complicados de resolver. Dado que cualquier intervención en los restos arqueológicos tiene un efecto permanente y el escenario de tales actuaciones se define por las características específicas de cada hallazgo (Rivero Weber 2011).

Además, el proceso de la excavación puede ser destructivo para los bienes arqueológicos ya que hasta que están enterrados su degradación está parada con el entorno estabilizado, pero a la hora de la excavación están sometidos a un cambio drástico de las condiciones ambientales. En este caso el desafío principal de la excavación arqueológica es adoptar las medidas necesarias de protección de los restos para evitar las pérdidas de hallazgos mientras se realiza el estudio y desarrollar unas estrategias de conservación de restos después de la excavación (Stanley Price 1984).

Obviamente, estas medidas de protección deben planearse con anticipación, sobre todo en el exterior, donde el control de las condiciones climáticas es imposible. Por lo tanto para minimizar el impacto ambiental es importante elegir el momento adecuado para la excavación de restos (Imagen 1) y ante todo aplicar los sistemas de cubrición (Pedelì y Pulga 2014).

Imagen 1: La situación durante una excavación: el yacimiento arqueológico esta cubierto con láminas de polietileno mientras se espera la construcción de una cubierta temporal, lo que puede perjudicar al estado de conservación de los restos. Eso se podría evitar con una planificación adecuada (Pedeli y Pulga 2014).



También debe considerarse que la conservación de yacimientos arqueológicos desde principio exige una estrecha cooperación en equipos multidisciplinares compuestos por profesionales como arqueólogos, conservadores, arquitectos y expertos en construcción de cubiertas de protección. Desafortunadamente, en los casos de urgencia, como por ejemplo en los que el hallazgo casual de unos restos arqueológicos supone la suspensión de otras obras (Imágenes 2,3), el trabajo colaborativo pasa a un segundo plano y la planificación previa de la protección de los restos resulta casi imposible (Rivero Weber 2011).

Otros aspectos no menos importantes que influyen al proceso de conservación son el factor económico y la burocracia. La mayoría de actividades arqueológicas no reciben presupuesto suficiente para la protección y conservación adecuada de restos arqueológicos o tienen recursos muy limitados y en estos casos se prioriza la financiación del proceso de excavación. Una planificación adecuada sólo será efectiva si se desarrolla una correcta repartición del presupuesto para la fabricación de estructuras de protección y su mantenimiento durante la excavación. Por otro lado, los trámites burocráticos son una parte inseparable del proceso de excavación ya sea por permisos de excavación, contratos de licitación o financiación o acuerdos y cuestiones que implican competencias multidisciplinares comunes a la excavación (Pedeli y Pulga 2014).

Imagen 2: Un hallazgo inesperado de restos arqueológicos durante la construcción de metro en Sofía, Bulgaria (Kirkpatrick 2014 (<https://www.washingtonpost.com/news/morning-mix/wp/2014/07/10/found-by-accident-some-of-the-worlds-inadvertent-archaeological-discoveries/>) (Fecha de acceso 22.11.2023))



Imagen 2: Yacimiento romano Serdica en la estación de metro en Sofía, Bulgaria. Al descubrir un hallazgo inesperado en el proceso de construcción de metro se tomaron medidas de conservación y adopción del hallazgo al entorno urbano. (Dowson 2022 (<https://archaeology-travel.com/bulgaria/serdika-ii-metro-station-roman-sofia/>) Fecha de acceso 22.11.2023))



La profesionalidad y habilidades organizativas del equipo de la excavación y conservación, así como su nivel de motivación y participación, también juegan un papel importante a la hora de la planificación y el trabajo sobre los yacimientos arqueológicos (Pedeli y Pulga 2014).

Todo lo expuesto previamente muestra que para facilitar el diseño de las estructuras protectoras y intervenir sobre los bienes arqueológicos adecuadamente es muy importante tomar una decisión equilibrada teniendo en cuenta el análisis previo del sitio arqueológico, aspectos administrativos, financieros y de manejo (Rivero Weber 2011).

02

ESTADO DE CUESTIÓN

2.5 Aplicación del diseño paramétrico al proceso de diseño

La mayoría de autores entienden por «diseño paramétrico» el método de diseño basado en parámetros con valores variables que permite generar y modificar el modelo cambiando dichos valores en tiempo real (Caetano et al. 2019). Como parámetros pueden servir área, dimensiones etc. La directa relación de los parámetros con la geometría del modelo convierte el diseño en un proceso iterativo (Holst et al. 2013).

El diseño paramétrico en arquitectura se remonta hasta la historia antigua y existen numerosos estudios científicos orientados a interpretación de las variables que afectan a los elementos de diseño en parámetros y ecuaciones paramétricas para entender un sistema de formas complejas (Monedero 2000). Los primeros ejemplos de tales intentos son las estructuras de civilizaciones antiguas cuya geometría se basa en cálculos matemáticos y astronómicos. Daniel Davis cita en su tesis doctoral varios ejemplos del

siglo XIX de uso del término «paramétrico» para describir modelos tridimensionales en matemáticas, entre los que se incluyen el análisis geométrico de las curvas catenarias usando "círculos paramétricos" de John Leslie realizado en 1821, el trabajo de James Dana publicado en 1837 sobre el dibujo de figuras de cristales a través de parámetros y variables o el estudio de superficies paramétricas hiperbólicas de Samuel Earnshaw de 1839 (Davis 2013)

El concepto de diseño paramétrico también se observa en la arquitectura de Gaudí. Así, para el diseño de Colònia Güell creó un modelo de cadenas colgantes con los sacos de perdigones para las cargas. (Imagen 3). El control de la longitud de las cadenas y las cargas le permitía modificar automáticamente la forma de los arcos catenarios y asegurarse de que la estructura estaría en compresión pura. Otro caso de aplicación del modelo físico para explorar la estructura lo encontramos de manos de Frei Otto. Con la intención de encontrar formas óptimas de estructuras de tensegridad, el arquitecto experimentó con superficies mínimas derivadas de películas jabonosas (Monedero 2000; Davis 2013).

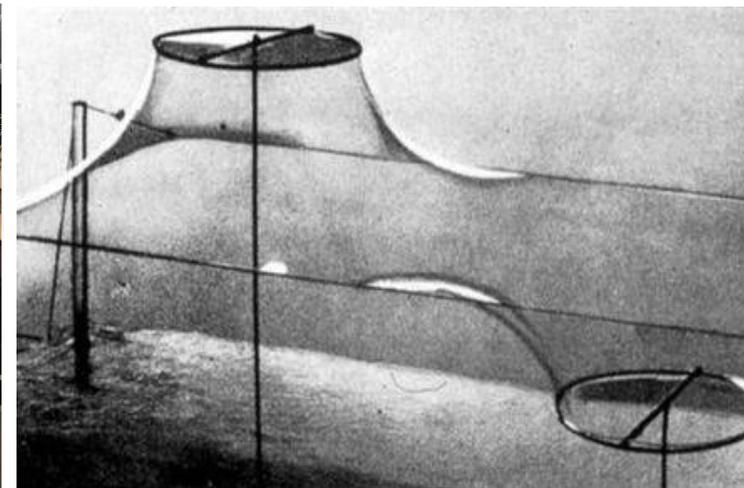
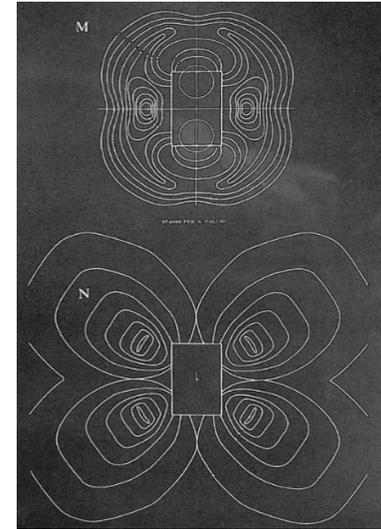
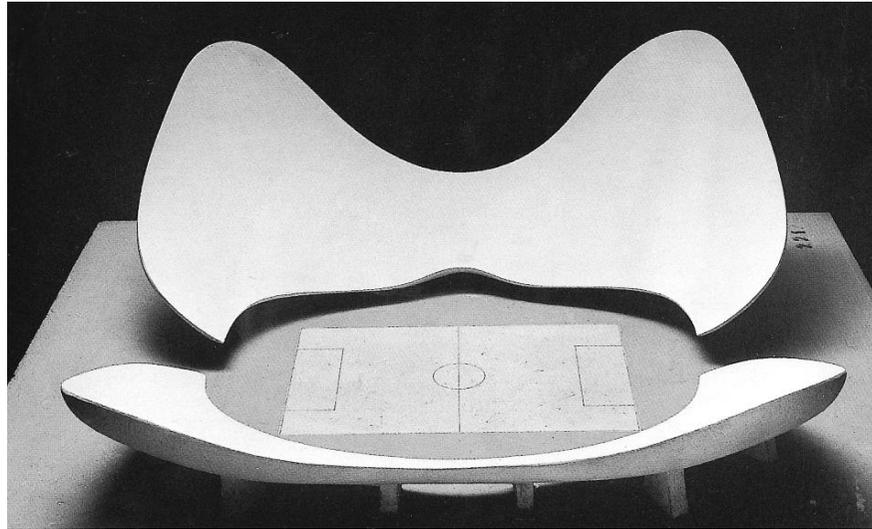


Imagen 3: La reconstrucción del modelo colgante de Gaudí para Colònia Güell (izquierda) y experimentos de Frei Otto con películas jabonosas (derecha). (<https://www.iaacblog.com/programs/sensing-forces/> Fecha de acceso: 22.11.2023)

En la década de 1940 Luigi Moretti estudió los principios de la relación entre el diseño arquitectónico y las ecuaciones paramétricas y por primera vez utiliza el término «arquitectura paramétrica». En 1960, cuando tuvo acceso a la potencia computacional necesaria, desarrolla el modelo paramétrico de un estadio que fue presentado en la exposición "Architettura Parametrica" en la XII Trienal de Milán (Imagen 4).

Imagen 4: Modelo del estadio de Luigi Moretti presentado en la exposición «Architettura Parametrica» en 1960 (Davis 2013).



Mientras tanto, en 1963 Ivan Sutherland creó SketchPad, el primer programa de diseño asistido por ordenador CAD (Computer Aided Design), que también contaba con establecimiento de relaciones paramétricas (Imagen 5) (Davis 2013).



Imagen 5: Ivan Sutherland demuestra el primer software paramétrico Sketchpad, 1963 (<https://www.sutori.com/en/story/history-of-computers-vCZuGhTdLWadwnPvA6zr61os>
Fecha de acceso: 22.22.2023)

Sin embargo, los avances computacionales no han estado disponibles para el público general hasta la aparición de AutoCAD en 1982, aunque el programa no incluía la funcionalidad paramétrica hasta que se añadió en su versión de AutoCAD 2010. Así, el primer software paramétrico comercial popular fue Pro/ENGINEER, creado por Samuel Geisberg en 1988. A diferencia de SketchPad era un programa tridimensional y multiusuario. Los principios funcionales de Pro/ENGINEER fueron introducidas en CATIA v4. Las posibilidades de esta nueva herramienta fueron utilizados por Gehry Partners para ayudar a realizar proyectos de arquitectura geoméricamente desafiantes como el Barcelona Fish (1991) y el museo Guggenheim de Bilbao (1997) (Imagen 6) y más tarde se convirtió en una base para el desarrollo de un software llamado Digital Project desarrollado por GehryTechnology en 2004. Al principios de ciclo XXI se amplía el uso de herramientas paramétricas como ArchiCad y Revit, que al principio se crearon para especialistas del diseño de edificios. La definición paramétrica de Revit se basa en ecuaciones paramétricas que permiten ajustar los elementos de diseño para circunstancias particulares y automáticamente editar los cambios introducidos en todos los planos, vistas y secciones. Revit, a diferencia de programas como Pro / ENGINEER y CATIA ocultaba las ecuaciones paramétricas detrás

de la interfaz. Así, el proceso de diseño se centraba en el uso de modelos paramétricos en vez de crearlos. Después este tipo de programa se denominó Building Information Modelling (BIM) (Davis 2013).

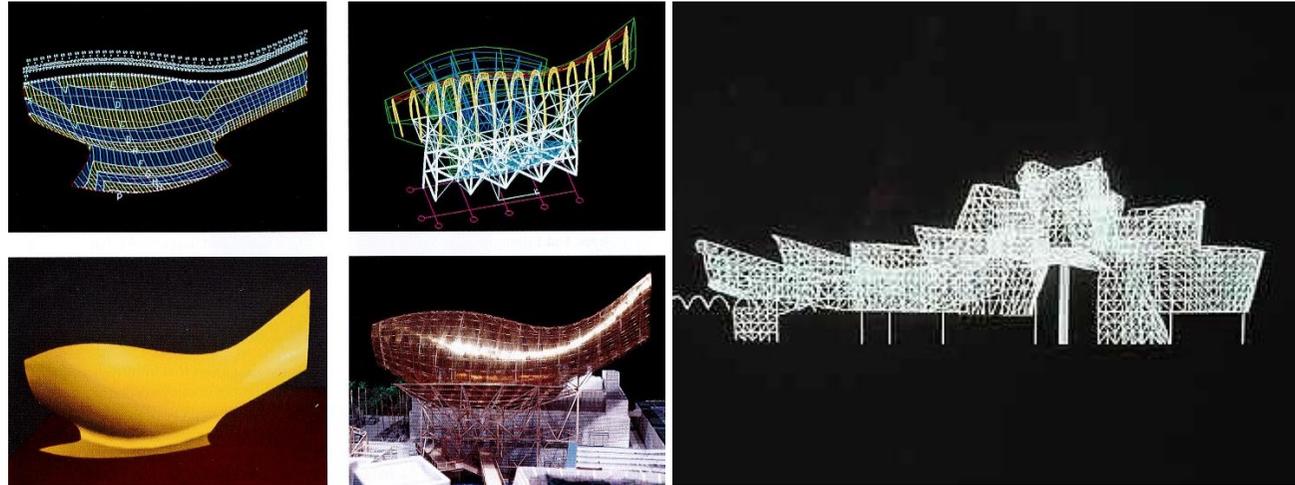


Imagen 6: La maqueta y el modelo CATIA de la escultura Barcelona Fish 1992 (izquierda) y modelo CATIA de la estructura de museo Guggenheim de Bilbao (<https://mafana.wordpress.com/2011/10/03/> Fecha de acceso 22.11.2023)

Al principios de ciclo XXI se amplía el uso de herramientas paramétricas como ArchiCad y Revit, que al principio se crearon para especialistas del diseño de edificios. La definición paramétrica de Revit se basa en ecuaciones paramétricas que permiten ajustar los elementos de diseño para circunstancias particulares y automáticamente editar los cambios introducidos en todos los planos, vistas, secciones y ect. Revit a diferencia de programas como Pro / ENGINEER y CATIA ocultaba las ecuaciones paramétricas detrás de la interfaz. Así, el proceso de diseño se centraba en el uso de modelos paramétricos en vez de crearlos. Después este tipo de programa se denominó Building Information Modelling (BIM) (Davis 2013)

También el modelado paramétrico se realizaba mediante lenguajes de codificación que estaban introducidos en los programas en base CAD y BIM. Los diseñadores podían escribir su propio algoritmo para modificar o automatizar algunos procesos del software. En las ultimas decadas este método de diseño se ha extendido sobre todo debido a la aparición de la programación visual que consiste en representar el algoritmo en componentes graficos (paquetes de codigo) en lugar de texto. Hoy en día las herramientas

de programación visual más populares son Grasshopper de Robert McNeel & Associates integrado dentro de la interfaz de Rhinoceros 2007 y Dynamo de Revit Autodesk (Monedero 2000).

2.6 Aplicación de los algoritmos genéticos al proceso de diseño

Junto con el desarrollo de diseño paramétrico, en los años 60 se realizaron varias investigaciones sobre la integración del concepto de evolución en sistemas computacionales con el fin de solucionar los problemas de optimización en ingeniería. La elaboración del primer algoritmo genético basado en evolución genética y selección natural pertenece a John Holland y sus colaboradores. En su obra “Adaptation in Natural and Artificial Systems” presenta algoritmos genéticos como un método de optimización (Barrera Poblete 2010).

Desde un punto de vista matemático, los algoritmos genéticos (GA) son algoritmos de optimización; sin embargo, presentan la peculiaridad de estar basados en nuestro actual entendimiento de la teoría de la evolución como resultado de la integración de elementos referentes a la selección natural así como ciertos principios de la genética (Haupt y Haupt 2004).

Los algoritmos de optimización clásicos se basan en la búsqueda de mínimos locales mediante diferentes métodos matemáticos aplicados de forma iterativa. Así, por ejemplo y explicándolo de forma simplificada, los llamados algoritmos de minimización de línea comienzan su búsqueda en un punto aleatorio de la superficie de la variable y se desplazan en una dirección aleatoria hasta que la variable incrementa; en este punto el algoritmo altera el vector direccional de búsqueda, para lo cual a su vez existen múltiples métodos, y repite el proceso. Tras una serie de iteraciones se alcanzaría una solución aceptable, normalmente asociada a un mínimo local, y el algoritmo se daría por finalizado (Haupt y Haupt 2004).

Los GA por su parte permiten que una población formada por muchos individuos evolucione en base a una serie de criterios de fitness que podemos establecer a conveniencia. El fitness es un concepto biológico que hace referencia a lo bien adaptado que se encuentra un individuo a las condiciones del medio (en nuestro caso, a los criterios de optimización). En el contexto de los GA el fitness hace relación a como de óptima es una solución para el problema en cuestión. Como ya hemos señalado, los algoritmos genéticos parten de una población de individuos (es decir, potenciales soluciones al problema) cada uno con un código genético propio (vease, una serie de características o valores de las diversas variables a considerar). El algoritmo somete a estos individuos a lo que en biología se denomina presión selectiva, que en nuestro caso corresponde con los parámetros de optimización, de tal manera que aquellos

individuos de la población que presenten un mayor fitness bajo estas condiciones son seleccionados descartando por ende el resto. En este punto entra en juego un operador de recombinación que actúa de forma análoga a como sucedería con la reproducción sexual en la naturaleza. Este realiza cruzamientos entre los individuos seleccionados anteriormente, recombinando sus características para producir los individuos que formará la siguiente generación de posibles soluciones. Esta recombinación, tal como en la naturaleza, es probabilística por lo que con una misma población inicial el algoritmo no siempre obtendrá las mismas soluciones en cada iteración. Adicionalmente, un operador de mutación tiene una probabilidad de alterar los distintos valores del “código genético” resultante de estas recombinaciones (Haupt y Haupt 2004; Barrera Poblete 2010).

Al igual que el caso de los algoritmos clásicos los GA funcionan de forma iterativa, produciendo como resultado de las reglas establecidas una evolución de la población. Sin embargo, podemos establecer diversos métodos para determinar el funcionamiento de dicha iteraciones. Estos van desde un reemplazo total de la generación anterior con nuevos individuos generados de la forma ya descrita a métodos en los cuales solo los miembros con menos fitness de la población son descartados y sustituidos por individuos nuevos. Mediante este segundo método se requieren más iteraciones para apreciar la evolución de la población de soluciones, pero al mismo tiempo previene con más fiabilidad que por la naturaleza probabilística del algoritmo se pierdan características presentes en la población que podría suponer un elemento clave de la solución final (Haupt y Haupt 2004; Barrera Poblete 2010)..

John Frazer fue uno de los primeros que utilizó el concepto de la evolución biológica en el diseño arquitectónico. En su libro «An Evolutionary Architecture» describe el las características de los algoritmos genéticos y su uso para la generación de formas arquitectónicas (Frazer 1995), presentando además un modelo digital orgánico que genera impulsos que modifican la geometría (Barrera Poblete 2010). En las últimas décadas los algoritmos genéticos se utilizan sobre todo para complementar el diseño paramétrico en la búsqueda de la solución óptima a un problema (Quispe y Ulloa 2021).

Desde entonces el diseño arquitectónico pone en uso estos algoritmos para buscar la geometría y desarrollar planos de los edificios, mejorar su rendimiento energético, reducir el material constructivo y en consecuencia el presupuesto necesario para el proyecto (Esmailian Toussi 2020)

Por ejemplo, los primeros conceptos de diseño generativo elaborados por John Frazer se encuentran reflejados en el trabajo de «A design optimization tool based on a genetic algorithm» realizado en 2002, donde los autores investigaron la idea de introducir el diseño generativo con el fin de mejorar el comportamiento medioambiental de los edificios optimizando su rendimiento térmico y de iluminación.

Los problemas generadores de diseño en este trabajo fueron las dimensiones y el emplazamiento de las ventanas en un edificio de oficinas, que dependían a su vez de las condiciones climáticas y la orientación. Adicionalmente se abordaron cuestiones como la elección de materiales constructivos y el tipo y tamaño de elementos de sombra (Caldas y Norford 2002).

En 2006 el trabajo «Multiple-constraint Genetic Algorithm in Housing Design» se presenta una herramienta basada en algoritmos genéticos con el fin de optimizar el proceso de diseño de un complejo residencial. El motivo del trabajo está relacionado con el aumento en la complejidad y la cantidad de información que incluyen los proyectos de construcción en la actualidad. En su proyecto investigaron la configuración óptima de tres tipos de unidades (1- apartamento estudio, 2- apartamento de un dormitorio, 3- apartamento de dos dormitorios) que conformaban el conjunto residencial según factores económicos, de exposición solar y vista (Narahara y Terzidis 2006).

En 2009 se publica el trabajo «Cost optimization of three-dimensional beamless reinforced concrete shear-wall systems via genetic algorithm» donde utiliza métodos generativos para reducir el material constructivo y así minimizar el coste del proyecto. El objetivo de estudio radica en la optimización de las dimensiones de las estructuras de soporte; como límite de diseño se usó el código técnico. El trabajo se ha realizado mediante el programa de optimización GENOPT (Atabay 2009).

El desarrollo tecnológico permitió ampliar las capacidades de las herramientas de diseño paramétrico introduciendo nuevos componentes de análisis y optimización a través de algoritmos genéticos. Así, el primer solucionador generativo integrado en un software paramétrico fue Galápagos, desarrollado por Rutten en 2010 para el sistema de programación visual Grasshopper (Rutten 2010). El solucionador trabaja con una serie de valores y permite alcanzar la geometría óptima conforme a un objetivo definido, como observamos por ejemplo en el trabajo «Building Massing Optimization in the Conceptual Design Phase». Los autores utilizaron Galapagos para buscar una volumetría de edificio en primeras fases de diseño según su ubicación y la sombra generada (Huang et al. 2015). En 2013 Vierlinger desarrolló el solucionador Octopus (Vierlinger 2013) que funciona de forma similar a Galapagos pero a con la diferencia de que proporciona una optimización multiobjetiva.

El software Revit (BIM) también permite utilizar la optimización multiobjetivo a través de Dynamo y Generative Design, ambas herramientas incorporadas en dicho programa. Un caso de uso de tales herramientas se representa en el trabajo «Structural Grid Predesign using Generative Design for Residential Building with Steel Structure on BIM Models» realizado en 2021. El estudio consiste en la

elaboración de un algoritmo para arquitectos que permita prediseñar y crear modelos BIM de los edificios residenciales con la estructura de acero y geometría regular, optimizando las dimensiones de las columnas y luces entre ellas con la intención de reducir el coste del proyecto. En el trabajo utilizan el software paramétrico Dynamo y algoritmos genéticos demostrando la eficacia de la introducción de esta tecnología en los procesos de diseño (Rodríguez Hernández et al. 2021).

Otro ejemplo de los últimos trabajos recién desarrollados a través de tales herramientas es el trabajo «Designing Generatively to Achieve an Efficient and Optimised Solution» Su investigación constituye una introducción de la parametrización y el método generativo para diseñar la protección solar más eficiente para una fachada acristalada. En el proyecto crearon un modelo BIM al cual posteriormente añadieron elementos de sombra que fueron modelados a través de Dynamo permitiendo crear un modelo computacional con parámetros variables y finalmente buscar la solución óptima para los elementos de sombreado aplicando algoritmos evolutivos de Project Refinery (Gradišar et al. 2022).

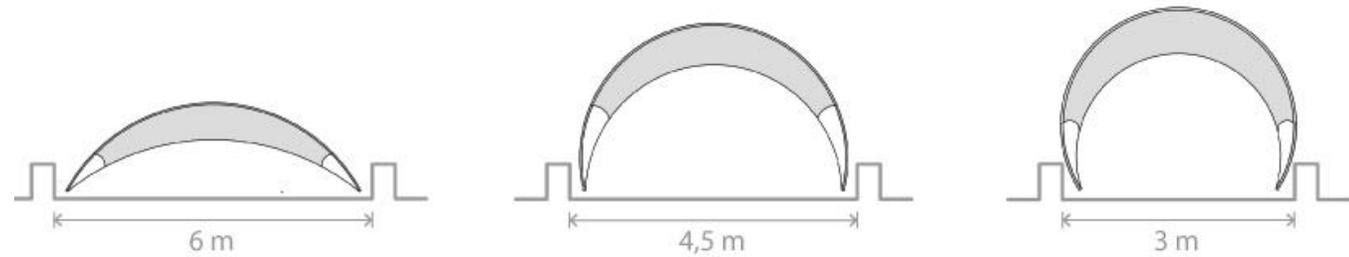
Este tipo de optimización ha demostrado desde su nacimiento un gran potencial para la resolución de problemas para los que los métodos clásicos de optimización no son capaces de dar una solución adecuada. Cabe señalar no obstante que para problemas más sencillos los GA resultan poco óptimos, siendo que requieren de tiempos de cálculo más prolongados.

2.7 Aplicación del diseño paramétrico y algoritmos genético al proceso de diseño de cubiertas de protección de yacimientos arqueológicos

El método de diseño mediante parametrización y algoritmos genéticos también ha sido aplicado en la protección de yacimientos arqueológicos.

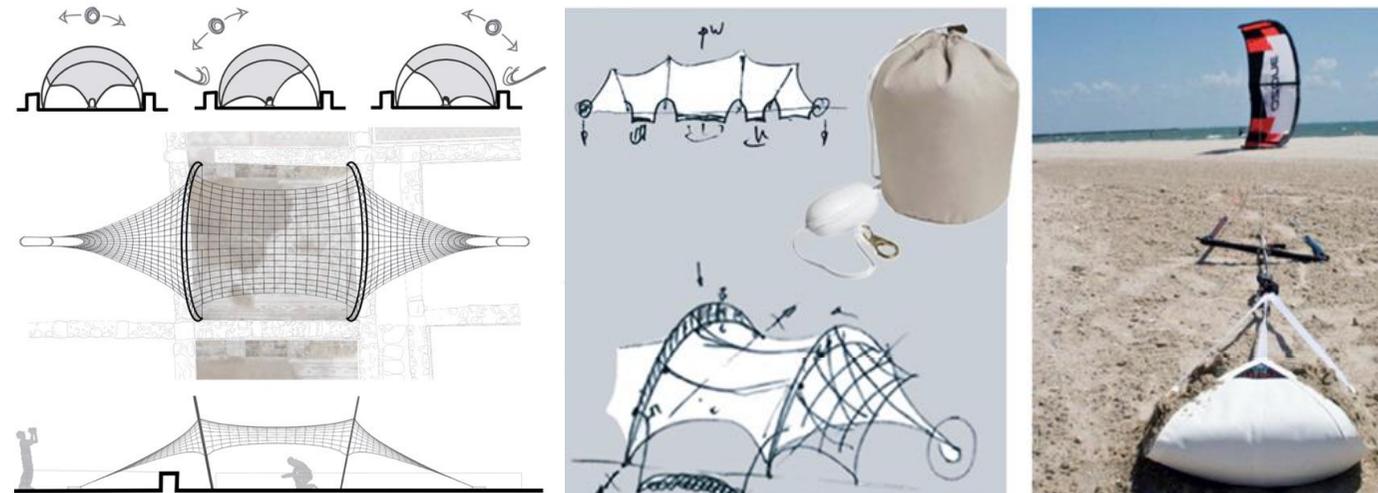
Así por ejemplo, los principios de parametrización se observan en el trabajo «Design novel covering system for archaeological areas» realizado en 2015, como resultado del cual se desarrolló una cubierta de protección de yacimientos arqueológicos para los mosaicos de la zona arqueológica de Nora en Cerdeña, Italia. El diseño de la cubierta se basa en una estructura textil ligera y de rápido montaje formada por dos arcos de flexión activa que proporcionan flexibilidad y adaptación según las diferentes necesidades del trabajo, el contorno y condiciones climáticas (Imagen 7) (Barozzi et al. 2015).

Imagen 7: Adaptación de los arcos de flexión para diferente contorno (Barozzi et al. 2015)



Como cimentación se usan placas de acero con cuatro puntos de apoyo. Además se propone el uso de un textil elástico, que se puede tensionar contra suelo mediante sacos de arena, que comúnmente se utilizan en deportes náuticos de vela (Imagen 8). Para desarrollar la estructura se usó los software paramétricos Rhinoceros y Grasshoper complementados con una simulación física en Kangaroo (Barozzi et al. 2015).

Imagen 8: Esquema de orientación de membrana textil, plano y sección de la cubierta (izquierda). Sacos de arena que se usan para anclar la cubierta (derecha) (Barozzi et al. 2015).



En 2016 se publica el trabajo «The application of free-form grid shells as protective shelters in archaeological sites», donde se propone el diseño de una cubierta de protección de yacimientos de sistema modular. El trabajo se apoya en conceptos de adaptación, la posibilidad de expansión, la ligereza de la estructura y su eficiencia económica.

El proceso de diseño presenta la elaboración de tres tipos de cubiertas con la estructura de cúpula reticulada que se basan en un modulo con dimensiones de 20m x 20m (Imagen 9) y aplica el método de búsqueda de forma «free-form finding» junto con la optimización estructural a través de algoritmos genéticos. Como parámetros de introducción se aplica la tipología de malla (rectangular, diamante, triangular, tetraktys) de cupula (Imagen 10), el area de cubrición, la longitud de elementos de malla y la altura de la estructura.

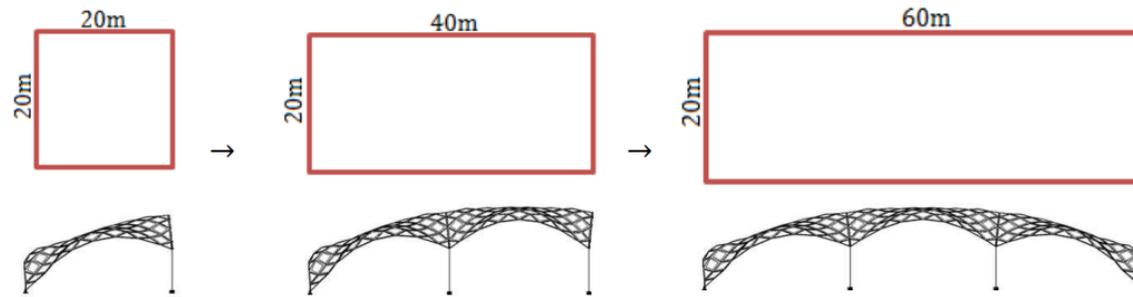


Imagen 9: Esquema de tres tipos de la cubierta modulares (Iuorio et al. 2016)

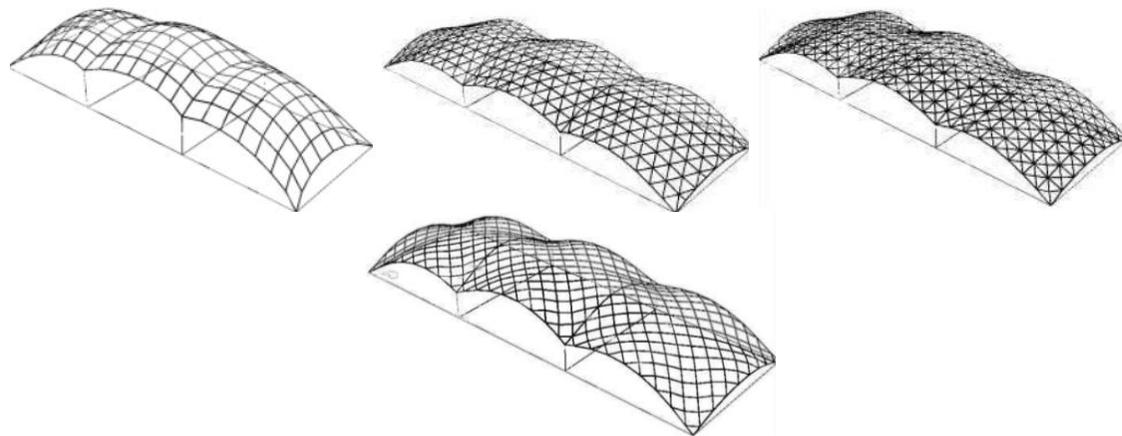


Imagen 10: Esquema de casos de estudio con diferente tipología de malla (a- rectangular, b- diamante, c- triangular, d- tetraktys) (Iuorio et al. 2016)

Como objetivo para el optimizador generativo se introduce el peso mínimo de la estructura, el número de nodos mínimo y las deformaciones mínimas. El proceso de modelado y optimización se realiza con las herramientas Rhinoceros 3D y Grasshoper y el análisis estructural a través de Autodesk Robot (Iuorio et al. 2016)

En el trabajo «Design criteria and procedures for archaeological shelters: towards flexibility thanks to algorithmic modelling» realizado en 2020 se plantea la cuestión sobre la eficiencia de las cubiertas de protección de yacimientos arqueológicos y se desarrolla una metodología para diseño de tales cubiertas aplicando los algoritmos genéticos para optimización estructural. El prototipo presenta una estructura de celosía apoyada en cuatro pilares. El modelo de la cubierta se desarrolla en el entorno paramétrico de Rhinoceros 3D y Grasshoper y la definición de la estructura se realiza mediante herramienta de cálculo estructural Karamba 3D y optimizador genético Octopus (Imagen 11). En este caso como parámetros de introducción se establece las subdivisiones de elementos de estructura horizontales y secciones de elementos estructurales. Como objetivo de optimización se propone el desplazamiento máximo de los nudos y las deformaciones mínimas (Sbrogió et al. 2020).

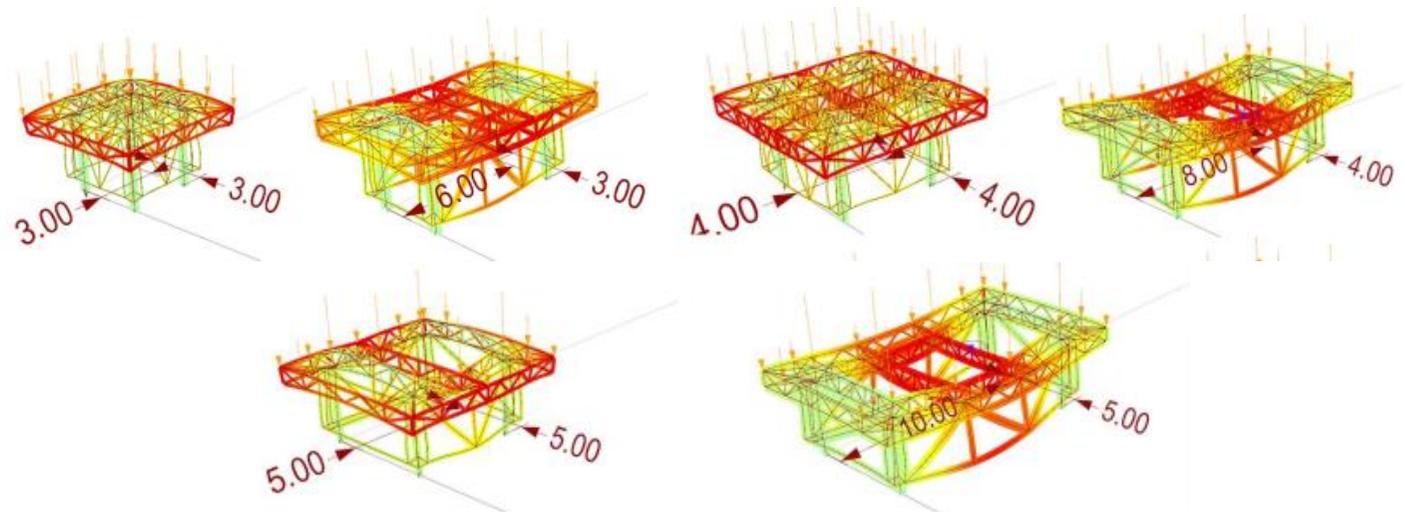


Imagen 11: Cálculo estructural de los prototipos de las cubiertas de protección de yacimientos arqueológicos (Sbrogió et al. 2020).

2.8 Cubiertas como protección de yacimientos arqueológicos y su eficiencia

Hoy en día las cubiertas se consideran un método de conservación más eficiente, sobre todo cuando se trata de preservar elementos frágiles que fueron diseñados y construidos para espacios interiores como mosaicos y pinturas murales. La cubrición de yacimientos arqueológicos reduce el impacto de las inclemencias del tiempo y la luz, especialmente los rayos ultravioletas; permite que el trabajo sobre los yacimientos continúe sin interrupciones en condiciones de lluvia, nieve, calor y sol extremos; restringe el acceso a las áreas excavadas, protegiéndolas contra el vandalismo; mejora la presentación de los restos y proporciona mayor accesibilidad al público (Pedeli y Pulga 2014).

Consecuentemente, los beneficios mencionados nos llevan a la idea de que cubrir un hallazgo siempre será mejor que dejarlo expuesto al medioambiente. Sin embargo, las cubiertas solo son eficaces si son capaces de reducir los factores perjudiciales del medioambiente y mantener el microclima de los restos estable pero, desgraciadamente, en la mayoría de los casos de cubrición no se cumplen estos requisitos (Tringham y Stewart 2008).

Tipicamente la cubierta proporciona menos protección de la que podría si se hubiera diseñado de otra manera. En algunos casos incluso exagera y acelera los procesos de deterioro de los restos (Aslan et al. 2018), ya que una cubierta diseñada inadecuadamente puede provocar un efecto dañino en el microclima de los yacimientos, modificando las condiciones de temperatura y humedad relativa en comparación con el exterior (Cabello Briones 2016).

A principios de la década de los 2000 se muestra un interés sobre la importancia del análisis del comportamiento de las cubiertas de protección para yacimientos arqueológicos (Tringham y Stewart 2008).

De este modo en 2001, en Italia, se empezó un estudio realizado por el Departamento de Nuevas Tecnologías, Energía y Medioambiente con el fin de desarrollar una metodología de planeamiento de cubiertas protectoras en contextos arqueológicos y estandarizar el proceso de su diseño. En el marco de trabajo se realizó un estudio sobre la eficiencia de los diferentes tipos de cubiertas existentes en Italia. Aplicando nuevos sistemas de monitorización y análisis de las condiciones microclimáticas se investigaron el estado de más de 100 yacimientos arqueológicos cubiertos en Italia (Laurenti 2002). Según los resultados obtenidos el 38,7% de las cubiertas investigadas se consideran de eficiencia intermedia y solo ligeramente más de la mitad de alta eficiencia (Merello 2013)

En el mismo periodo Yael Alef realiza una investigación sobre la eficacia de las cubiertas de protección en Cesarea, Israel. Como parte de estudio se construyeron cuatro cubiertas sobre diecinueve mosaicos dentro de parque nacional Cesarea, con una superficie total de 810 m². Sin embargo, el análisis mostró que el entorno marino creaba condiciones específicas debajo de las cubiertas que aumentaron el deterioro de los mosaicos (Aslan et al. 2018)

En 2008 Jacques Neguer and Yael Alef exponen su estudio sobre evaluación de cubiertas protectoras sobre mosaicos. La evaluación de 106 mosaicos cubiertos en Israel reveló que más del 30% de los hallazgos sufren destrucción avanzada y procesos de deterioro activo y algunos de ellos se han perdido permanentemente (Neguer y Alef 2008).

Entre otros problemas también se aborda la materialidad de las cubiertas, como por ejemplo en el trabajo de Funda Yaka Cetin y Basak Ipekoglu publicado en 2012. Este ahonda en el efecto de conservación de los restos arqueológicos bajo estructuras de protección con materiales transparentes. En la actualidad existen un número considerable de este tipo de cubiertas y lamentablemente todos los ejemplos investigados muestran problemas de conservación causados por efecto invernadero, la condensación y iluminación excesiva de hallazgos (Yaka Çetin et al. 2012)

La influencia de la tipología de las estructuras protectoras se observa también en el estudio de Cristina Cabello Briones realizado entre 2018 y 2019. Este consiste de un análisis comparativo de dos tipos de las cubiertas arqueológicas que además se encuentran en zonas aledañas. El análisis se basaba en monitorización de las condiciones medioambientales debajo y fuera de la cubierta. Los resultados mostraron que ambas cubiertas contribuyen al mantenimiento de un ambiente más estable en relación con el exterior, sin embargo la autora destaca que la estructura de tipo cerrado se comporta de manera más eficiente y en este caso sería la más adecuada para la conservación del yacimiento (Cabello Briones 2016).

En 2022 se publica un trabajo consistente en el análisis de las cubiertas de protección de yacimientos arqueológicos a ras de suelo en España. La investigación fue realizada por un equipo de la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Sevilla y presenta un desarrollo de la clasificación de coberturas según su estructura, material constructivo, características de protección y mantenimiento. También se realizó análisis de efectividad de protección de restos a través de herramientas de control ambiental centrándose en estudio de sombra y comportamiento de viento. Los resultados del análisis mostraron que ninguna de las tipologías investigadas ofrece una protección adecuada de los hallazgos (Ordóñez-Martín 2022).

El problema radica en que a la hora del diseño de una cubierta arqueológica la protección de los restos va detrás de otras prioridades como la estética arquitectónica, la adaptación de los yacimientos para la visitas públicas o la reducción del coste del proyecto. Otro factor es la imposibilidad de obtener información suficiente para el diseño a causa de un margen de tiempo muy limitado. Por lo tanto, la falta de evaluación de los efectos de la cubrición de los yacimientos puede causar daños no deseados como: la cristalización de sales solubles, el aumento del crecimiento biológico como resultado de la migración de agua y el aumento de la humedad o el desprendimiento de superficies decoradas como resultado de las fluctuaciones de temperatura y humedad (Palumbo 2002). También el aumento de la suciedad y la deposición de polvo debido a una reducción de la velocidad del viento y el aumento de las turbulencias debajo de la cubierta (Cabello Briones 2016).

Sin una comprensión adecuada de la importancia de mantener las condiciones climáticas equilibradas y estables la instalación de las cubiertas para la protección de yacimientos arqueológicos sería ineficiente y costosa de mantener (Palumbo 2002). Además de los potenciales efectos negativos ya mencionados.

03

OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es desarrollar un método de diseño de las coberturas ligeras y de rapido montaje para la protección de yacimientos arqueológicos a traves de software paramétrico y algoritmos genéticos.

Como objetivos específicos se plantean:

- Análisis de las estructuras ligeras y de rapido montaje y su adopción en diseño de las coberturas arqueológicas.
- Análisis de capacidades de parametrización y algoritmos genéticos como herramientas de optimización del proceso de diseño.
- Aplicación de las estructuras ligeras y de rapido montaje.
- Aplicación de algoritmos genéticos en el diseño de cubiertas de yacimientos arqueológicos.

04

METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos mencionados anteriormente se ha desarrollado una metodología que se basa en las investigaciones abordadas en el apartado 2.3 y que permite diseñar una cubierta paramétrica de protección de yacimientos arqueologicos que se adapte a las condiciones del terreno y los parametros medioambientales, tales como el nivel de radiacion solar y la sombra.

- Fase I

La primera fase consiste en la búsqueda y recopilación de información sobre la problemática que supone la protección de los restos arqueológicos y los métodos existentes para su solucion, así como una revisión de la literatura existente al respecto.

También, para cumplir la primera fase se realizó una investigación sobre la aplicación de cubiertas de protección como método de conservación de yacimientos arqueológicos, se estudió su tipología, particularidades y criterios de diseño. Para determinar aquellos criterios nos centramos en cuestiones como la variabilidad en las particularidades de cada intervención, el encuentro de cimentación sobre un yacimiento arqueológico, los diversos parámetros a considerar en la protección de los restos, el dimensionamiento recomendado de las cubiertas protectoras, el mantenimiento de condiciones climáticas bajo la cubierta, la presentación de los restos y el acceso al público.

Además, analizamos coberturas arqueológicas de la región mediterránea con especial atención sobre el ámbito de la península ibérica. En el caso de este trabajo se dió prioridad a las estructuras ligeras, reversibles y de rápido montaje.

– Fase II

La segunda fase del trabajo constituye la definición paramétrica de una cubierta de yacimientos arqueológicos que se adapta al perímetro del hallazgo y proporciona una protección eficaz contra los efectos perjudiciales de la radiación solar y la lluvia. En este trabajo el desarrollo de la cubierta se realizó sobre el contorno de la Tumba de Postumio y la Tumba de Tres Puertas del conjunto arqueológico de Carmona.

La Fase II se subdivide a su vez en cuatro pasos:

- 1) Análisis de casos de estudio
- 2) Estudio de software que se va a usar
- 3) Definición de parámetros y búsqueda de forma (superficie de protección)
- 4) Optimización de la forma según las condiciones climáticas a través de algoritmos genéticos.

En primer lugar, realizamos el análisis previo de los casos de estudio - Tumba de Postumio y Tumba de Tres Puertas: su geometría y contorno, condiciones climáticas en que se encuentran, estado de conservación, causas de deterioro y recomendaciones para su protección.

En segundo lugar, se planteó estudiar las capacidades de las herramientas que han sido utilizadas en este trabajo, a saber: herramienta de diseño paramétrico Rhinoceros con su complemento Grasshopper, herramienta de análisis ambiental LadyBug (complemento de Grasshopper) y de diseño generativo - Octopus.

Después, en base a la investigación previa realizada en la Fase I, se definió el perímetro de intervención, las particularidades del terreno y los requisitos de protección de los restos. A continuación, dichos requisitos se utilizaron para determinar los parámetros fijos y variables del modelo paramétrico de la cubierta. Los parámetros variables se utilizaron como parámetros de diseño decisivos.

Al definir los parámetros de diseño se desarrolló una definición paramétrica inicial de la superficie de la cubierta utilizando programación visual de Rhinoceros y su complemento Grasshopper. Después, pasamos a la parte de optimización medioambiental en la cual, mediante software de análisis ambiental LadyBug y algoritmos genéticos de Octopus, buscamos una geometría de cubierta óptima que proporcione protección de la radiación solar tanto en el periodo estival como en el invernal y que al mismo tiempo permitiese aprovechar la captación de radiación solar para introducir placas fotovoltaicas.

– Fase III

En cuanto encontramos la geometría óptima, el siguiente paso fue la creación de la estructura de la cubierta. Esta parte abarca cuestiones como la elección del material estructural y envolvente, el encuentro de la cubierta con el suelo arqueológico, el diseño de las uniones de la estructura y el desarrollo del modelo paramétrico de la cubierta, el cual permite controlar sus elementos estructurales.

Al definir la estructura de la cubierta se realizó la importación de este modelo paramétrico al entorno BIM mediante el complemento de Revit “Rhino.Inside.Revit” con el fin de ordenar los elementos de la estructura por categorías, introducir especificaciones e indexarlas como base de datos y elaborar planos, vistas y cortes de la cubierta que permiten facilitar el proceso de fabricación y llevar a cabo el proyecto.

Y finalmente discusión de resultados y conclusiones.

5.5 Historia de cubiertas de protección de yacimientos arqueológicos

La región Mediaterranea posee un gran patrimonio cultural que ha ido saliendo a la luz desde el siglo XVIII, cuando se realizaron campañas sistemáticas de excavación. Desde entonces la conservación efectiva de los yacimientos arqueológicos se convirtió en un asunto de gran importancia (Aslan 2008). En este momento era común mover las piezas arqueológicas (mosaicos, pinturas murales, etc.) a los museos. Luego, a finales de siglo XVIII, se adquiere conciencia del valor didáctico de estas piezas y la construcción de las cubiertas para su protección se extiende, aunque todavía las cubiertas no se consideraban como una estrategia principal dentro de la consevación de los hallazgos (Cabello Briones 2015). Eso cambia a principios del siglo XX debido a una considerable preocupación sobre la conservación del patrimonio histórico. Normalmente, las estructuras de protección representaban el uso de los materiales y las tecnologías característicos de esta época. Por ejemplo, el uso de acero como un material de construcción nuevo se observa en varias cubiertas de protección en yacimientos arqueológicos de Pompeya y Herculano. También se dieron casos de aplicación de hormigón armado como en caso de numerosas reconstrucciones del Palacio de Cnosos, Creta (Aslan 2008; Kienzle 1998). En los años cincuenta se populariza el uso de materiales transparentes como plástico y vidrio que podemos ver en la cubierta de la villa romana del Casale en Piazza Armerina (Aslan 2008; Rizzi 2008).

Los materiales sintéticos también encontraron su uso en la conservación y la excavación. La mayoría de ellos son de polietileno, nylon, poliéster o polipropileno que se utilizan para cubrir áreas enteras o particulares durante la excavación y entre campañas de excavación. De estos, algunos como los geotextiles, se utilizan para la cubrición de hallazgos de manera temporal y/o permanente (Pedelí y Pulga 2014). A finales del siglo XX y principios del siglo XXI se reconocen los problemas de eficiencia de las cubiertas existentes y se proponen nuevas alternativas de diseño para las estructuras de protección (Aslan 2008).

Así en 1989 se desarrolla el sistema de cubrición temporal «Hexashelter» para proteger dos mosaicos en Chipre – el mosaico de Orfeo y el mosaico de Hércules y Amazonía (Imagen 12). El diseño de la cubierta se basa en conceptos de construcción ligera, reversible y de rápido montaje (Imagen 13). Las estructuras se adaptan al terreno irregular y permiten su ampliación por su carácter modular (Agnew y Coffman 1991).

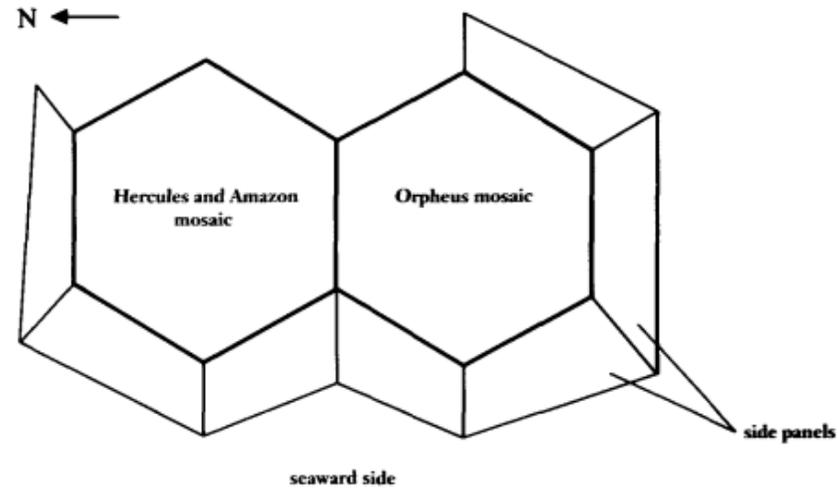


Imagen 12: Esquema de la cubierta de protección de yacimientos arqueológicos «Hexashelter» (Agnew y Coffman 1991).



Imagen 13: La estructura de la cubierta «Hexashelter». El montaje de prueba (izquierda) y la construcción de la cubierta en Noviembre de 1989 (derecha) (Agnew y Coffman 1991).

Actualmente los conceptos de ligereza y rapido montaje presentados en el sistema «Hexashelter» continúan desarrollándose y se han convertido en requisitos del diseño de las cubiertas de protección de yacimientos arqueológicos.

5.6 Clasificación de las cubiertas de yacimientos arqueológicos

Hoy en día existe una clasificación bastante amplia de los distintos tipos de las estructuras de protección de yacimientos arqueológicos que dependen de sus características técnicas y función.

De esta manera podemos dividir la tipología de las cubiertas de yacimientos arqueológicos según:

- Tipo de protección

En función del tipo de protección existen las coberturas abiertas, cerradas y semi-abiertas (Imágenes 14, 15). Las cubiertas abiertas sirven para proteger los yacimientos arqueológicos contra el impacto de las precipitaciones y la luz solar directa. Las coberturas semi-abiertas están diseñadas para evitar los impactos laterales de las fuerzas naturales que envuelven las estructuras en todos los lados y las aíslan del resto del sitio. Las coberturas cerradas proporcionan una protección completa frente a sol y la lluvia y dan la oportunidad de controlar el clima, proporcionando condiciones interiores adecuadas para los restos (Ertosun 2012; Ordóñez-Martín 2020).

Imagen 14: Cubierta de tipo cerrada en el yacimiento de Villa Romana La Olmeda, Pedrosa de la Vega (<https://www.palenciaturismo.es/visitar/lugares-interes/villa-romana-olmeda>
Fecha de acceso: 23.11.2023)

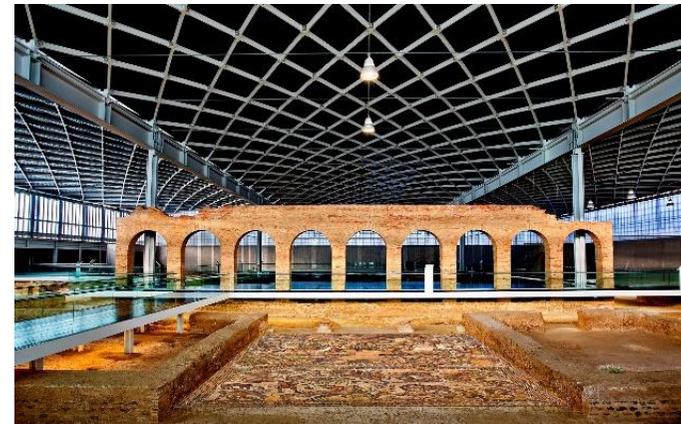


Imagen 15: Cubierta de tipo abierta en yacimiento arqueológico de palacio Minoico de Malia, Grecia. (<https://www.dailycrete.com/2020/05/malia-minoan-palace-in-pictures.html> Fecha de acceso: 23.11.2023)



– Área de protección

Según el área de protección se distinguen cubiertas sobre hallazgos particulares que se utilizan para la protección de un elemento muy concreto y cubiertas sobre áreas más amplias (Imagen 16) donde hay un conjunto de elementos arquitectónicos, arqueológicos y artísticos que, por sus características diferenciadas, requieren de un gran esfuerzo para su preservación (Pedelí y Pulga 2013).

Imagen 16: Cubierta para el Parque Arqueológico de El Molinete en Cartagena, España (<https://www.archdaily.mx/mx/02-139552/cubierta-para-el-parque-arqueologico-de-el-molinete-amann-canovas-maruri> Fecha de acceso: 22.11.2023) y una estructura temporal para la protección localizada durante el proceso de excavación (Pedelí y Pulga 2013)



– Tipo de material

Por el tipo de material las cubiertas se dividen en cubiertas de materiales tradicionales (naturales) como madera, bambú o teja y tecnológicos como vidrio, hormigón, fibrocemento, polietileno, polipropileno, geotextil (Imagen 17) (RivieroWeber 2011)

Imagen 17: Cubierta de acero y membrana PTFE en el yacimiento de Göbekli Tepe de Sanliurfa, Turquía (<https://www.kklf.de/schutzdach-goebekli-tepe-tuerkei> Fecha de acceso: 22.11.2023) Uso de materiales naturales (piedra local y madera) en la cubierta «AkragaShelter» en el conjunto arqueológico Valle de los Templos de Agrigento en Sicilia, Italia (Masera et.al 2015)



– Sistema estructural

Uno de los criterios determinantes de diseño de las coberturas es el tipo estructural. En general, las cubiertas pueden ser de estructura reticular o de estructura tensada o el diseño de la cubierta de protección puede combinar varias sistemas estructurales (Imagen 18) (Pedelí y Pulga 2013).

Imagen 18: Cubierta de protección estructura reticular en el yacimiento arqueológico de Çatalhöyük, Turquía. (<https://www.dailysabah.com/travel/2020/02/21/world-heritage-in-turkey-catalhoyuk-home-of-mankinds-ancient-saga> Fecha de acceso: 22.11.2023) y ejemplo de cubierta tensada en el yacimineto Hagar Qim, Malta (Zanelli 2015)



– Periodo de duración

El último criterio, pero no por ello el menos importante, es la longevidad proyectada para la cubierta. Según el tiempo de excavación y sus objetivos existen cubiertas temporales y permanentes. Las estructuras temporales ofrecen protección durante una o más temporadas de excavación y al final se eliminan totalmente o se reemplazan por una permanente. Se construyen urgentemente con presupuestos limitados y se utilizan para minimizar los efectos destructivos del entorno sobre los restos y ofrecer cierta protección a los excavadores. Las cubiertas permanentes proporcionan una protección de restos durante períodos relativamente más largos (RivieroWeber 2011; Pedelí y Pulga 2013).

5.7 Critetios de diseño de cubiertas de protección

El diseño de las cubiertas de protección de yacimientos arqueológicos es bastante específico y diferente al del resto de estructuras ya que es necesario tener en cuenta la fragilidad de los restos, su naturaleza, las peculiaridades de su ubicación y su valor histórico (Pedelí y Pulga 2013; Aslan 2018 et al.). Prácticamente no existen normativas técnicas para la proyección de las cubiertas arqueológicas. Normalmente se recurre a documentos internacionales y nacionales de protección del patrimonio cultural, manuales para la restauración, recomendaciones prácticas de conservación de hallazgos in situ e investigaciones sobre la eficacia de las cubiertas arqueológicas (Rivero Weber 2011; Sbrogió et al. 2020).

A pesar de las características diferenciales de cada yacimiento, en las fuentes mencionados anteriormente se observa una similitud de los requisitos para el diseño de estructuras protectoras de los restos arqueológicos. Algunos autores incluso dividen los criterios de diseño en varios grupos relacionados con diferentes aspectos que determinan el éxito en la protección de los hallazgos. Por lo tanto, a la hora de diseñar una cubierta de yacimientos arqueológicos hay que tener en cuenta diversos aspectos de la conservación y protección, aspectos técnicos, estéticos y sociales (Rizzi 2018; Kirli Özer y Arin Ensarioğlu 2022).

a) Criterios de diseño: aspectos de la conservación y protección

La función principal de una cubierta de yacimientos arqueológicos es proporcionar condiciones adecuadas para conservación y protección de los restos. La mayoría de especialistas coinciden en que el diseño de las cubiertas debe cumplir los siguientes criterios básicos:

- Otorgar protección a los restos arqueológicos de las condiciones ambientales y amenazas biológicas.
- Habilitar la regulación del clima bajo la cubierta (sombra solar, luminosidad, flujo de aire, condensación de humedad).
- Otorgar protección frente a actos vandálicos.
- Requerir una intervención mínima.
- Poseer o habilitar un sistema de drenaje eficaz.
- No perder el proceso de estudio y documentación de la excavación (Pedelí y Pulga 2013; Aslan 2018 et al.)

b) Criterios de diseño: aspecto técnico

Los aspectos técnicos conciernen al desarrollo de un sistema constructivo eficaz, la elección de materiales, la durabilidad de la estructura y su mantenimiento. A la hora de diseñar una cubierta arqueológica es recomendable mantener un presupuesto razonable y que el diseño de la estructura contribuya al proceso de montaje rápido y no cause daños a los restos y el medioambiente (Kırlı Özer y Arin Ensarioğlu 2022) Por consiguiente podemos destacar los siguientes criterios:

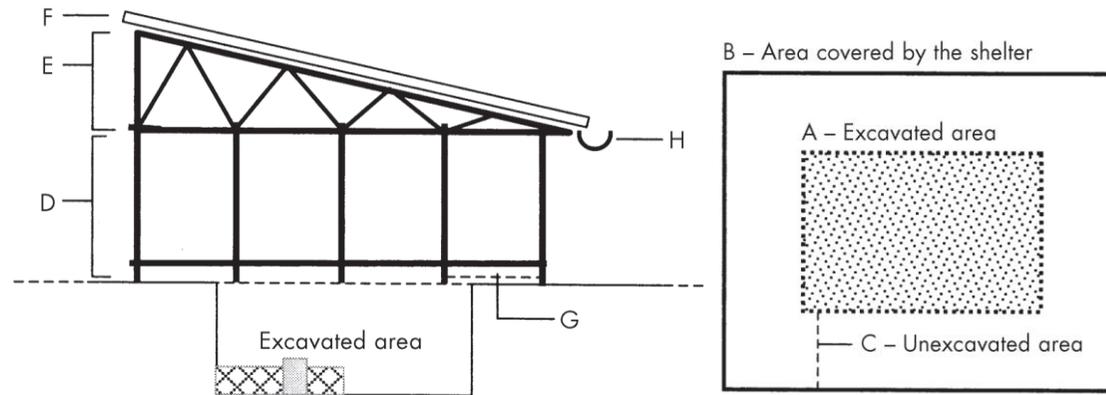
- Uso de un sistema estructural ligero, reversible y de rápido montaje.
- Uso de elementos prefabricados fáciles de transportar.
- Facilidad de mantenimiento de la cubierta.
- Uso de materiales reparables y fácilmente reemplazables.
- Flexibilidad y posibilidad de expansión .
- Conexión mínima de apoyos.
- Construcción de bajo coste.

De todas las fuentes revisadas las instrucciones más detalladas a todo este respecto las encontramos en el libro «Conservation Practices on Archaeological Excavation». En este se encuentran recomendaciones para el diseño de las cubiertas arqueológicas correspondientes a su tipología y material constructivo. También se presenta una guía de diseño para una cubierta tradicional estándar, que consiste en una estructura abierta metálica con un techo de lámina.

Según dicha guía, para determinar las dimensiones de la cubierta es necesario retractarse aproximadamente 1 metro del perímetro del yacimiento, garantizando una suficiente adecuada de

protección contra la lluvia y la incidencia de sol directo. Los soportes verticales deben tener una distancia máxima entre ellos de 1 a 1,25 m. El techo debe ser diseñado con una inclinación del 10 -25 % por metro para evacuación de aguas. La estructura de la cubierta debe ser ligera y al mismo tiempo soportar las potenciales cargas eólicas y de nieve. El perímetro de la zona excavada debe ser protegido con una valla (Imagen 19).

Imagen19: Esquema de sección y plano de una cubierta arqueológica tradicional. F- envolvente; E-techo, D- Soportes, H-Sistema de drenaje; G- distancia entre soportes (Pedelí y Pulga 2013).



Además de las recomendaciones aportadas en la literatura dedicada a conservaciones arqueológicas, la estructura de una cubierta protectora debe cumplir el código técnico de construcción establecido en su región (Pedelí y Pulga 2013).

c) Criterios de diseño: aspectos estéticos y sociales

Aparte de cumplir su función principal de protección, una cubierta de yacimientos arqueológicos debe disponer de cualidades estéticas que armonicen con el paisaje arqueológico y potencien la presentación de los restos, así como la interacción entre visitantes y el yacimiento. Teniendo en cuenta dichas recomendaciones se distinguen los siguientes criterios:

- Contribuir a la presentación e interpretación de los restos
- Proporcionar a los visitantes comodidad y facilitar la comprensión de los hallazgos
- No perjudicar la imagen del yacimiento y el paisajismo (Aslan et al. 2018).

5.8 Visión general de las cubiertas de yacimientos de protección arqueológicos de la región mediterránea con especial atención sobre el ámbito de la península ibérica

La región Mediterránea posee un rico patrimonio cultural, diverso en sus aspectos históricos y culturales, pero a pesar de esto tiene una serie de características en común, tales como:

- Comparten periodo arqueológico, múltiples valores culturales y el periodo de su descubrimiento;
- Suelen ser yacimientos arqueológicos situados en paisajes abiertos;
- Es frecuente encontrar yacimientos arqueológicos grandes al aire libre, típicamente estructuras de altura baja;
- Comparten el tipo de medidas de conservación y protección aplicadas (Aslan 2018 et al.)

A continuación procederemos a examinar unos ejemplos de cubiertas de protección de yacimientos arqueológicos en el ámbito de península ibérica.

- Cubierta para la Necrópolis paleocristiana

La necrópolis paleocristiana forma parte del conjunto arqueológico de Tarragona y presenta un conjunto funerario de la época tardorromana datado de los siglos III-V d. C. El yacimiento fue descubierto en 1923 y en la década del 1970 el proyecto de cubrición de la necrópolis comenzó (Imagen 20).



Imagen 20: Bóvedas vaídas de Emilio Pérez Piñero, 1972. Proceso de cubrición de la necrópolis Paleocristiana de Tarragona (Pérez Almagro 2013)

La cubierta de la necrópolis, diseñada por el arquitecto Emilio Pérez Piñer, es de tipo abierta y consiste de una estructura reticular metálica que forman las catorce bóvedas vaídas reticulares, apoyadas sobre unas cerchas de arco y soportes anclados sobre zapatas de hormigón armado que cimentan el conjunto sin dañar el yacimiento. Originalmente el material de revestimiento eran placas de fibrocemento, que en los años noventa fueron sustituidos por polivinilo translúcido. La cubierta proporciona una protección contra el sol directo y la lluvia. Debido a la solución constructiva y de material se caracteriza como una estructura ligera ($4,5\text{kg/m}^2$) y de rapido montaje (Pérez Almagro 2013; González Juste 2022)

- Ampliación de la cubierta protectora de la villa romana de «El Ruedo» en Almedinilla, Cordoba.

La zona arqueológica de El Ruedo se encuentra en Almedinilla, Cordoba. El yacimiento presenta una villa compuesta de un espacio residencial y otro productivo, cuyos restos datan desde el siglo I al VII y una necrópolis datada desde el S. III al VII. El yacimiento, una vez excavado, fue protegido parcialmente con una cubierta provisional que debía ser sustituida posteriormente por otra. Sin embargo, esto no sucedió y la cubierta adquirió el carácter de permanente. En el período de 2003 a 2010 se realizan dos intervenciones destinadas a ampliar la estructura inicial. La nueva cubierta consiste en una estructura metálica de características similares a la ya existente (Imagen 21).

Imagen 21: Cubierta en el yacimiento arqueológico de la villa romana «El Ruedo» (https://www.cordoba24.info/html/villa_roma_el_ruedo.html Fecha de acceso 22.11.2023)



Está compuesta por pilares de perfiles de acero laminado, vigas conformadas por cerchas también de perfiles de acero laminado y cimentación a base de zapatas aisladas de hormigón armado. La envolvente esta formada por chapa grecada galvanizada. Como la estructura se ha realizado en distintos momentos, en las zonas de encuetro de los distintos tramos se observan uniones realizadas por soldadura. La cubierta posee un sistema de recogida de aguas, proporciona protección contra luz solar y lluvia y permite la ventilación natural (Sin autor. Trabajos cubierta villa romana 2018)

– Cubierta para el mosaico de los Amores

El mosaico de los Amores, esta situado en el conjunto arqueológico de Cástulo datado del siglo I d.C. e inicios del II d.C. El yacimiento fue hallado en 2011 debido a unas practicas de excavación por parte de estudiantes y en 2015 con el fin de evitar el deterioro derivado de los factores climáticos se instaló una cubierta de protección, cuya forma intenta mostrar la volumetría original del edificio. Esta consiste en una estructura metalica de pórticos a dos aguas, apoyados sobre dados de hormigon y cubiertos con paneles sándwich de acero galvanizado prelacados. El acceso de las visitas se encuentra facilitado por una pasarela sobre el propio mosaico fijada a la estructura de la cubierta.

Además posee una envolvente de vegetación en los laterales de la estructura que proporciona la protección necesaria contra la incidencia solar (Imagen 22) (Carrero sin fecha).

Imagen 22: Cubierta para el mosaico de los Amores de Cástulo en Linares, Jaen (<http://canca-carrero.blogspot.com/2014/04/cubierta-provisional-del-mosaico-de-los.html>
Fecha de acceso: 22.11.2023)



– Cubierta en el yacimiento arqueológico de «Fuente Nueva 3» en Orce, Granada

El yacimiento arqueológico Fuente Nueva 3 se encuentra en la Zona Arqueológica de la cuenca de Orce, Granada. El yacimiento destaca por la aparición de piezas de industrias líticas, fundamentalmente de sílex y de piedra caliza, que se consideran de las más antiguas conocidas en Europa occidental. En 2015 se inició el proceso de instalación de una cubierta con el fin de facilitar los trabajos de investigación y garantizar la protección del yacimiento a la vez de permitir las visitas públicas. La cubierta es de tipo cerrada y su volumen se divide en tres módulos formados por superficies de doble curvatura de diferente inclinación, lo que favorece su mejor adaptación al terreno. El desnivel de estas partes promueve la ventilación natural y la entrada de luz indirecta. La estructura se resuelve con perfiles de acero laminado con pilares apoyados sobre zapatas corridas de hormigón, que a su vez se apoyan directamente sobre la tierra a nivel al que quedó después de las excavaciones arqueológicas. Para el revestimiento se utilizan lamas de chapa de acero galvanizado. La cubierta, debido a su carácter modular, permite modificaciones y ampliaciones futuras (Imagen 23) (Sin autor. Consejería de Turismo, Cultura y Deporte. Instalación de cubierta en el yacimiento arqueológico de Fuente Nueva 3. Orce, Granada).

Imagen 23: Cubierta en el yacimiento arqueológico de «Fuente Nueva 3» de la cuenca de Orce, Granada (<https://www.juntadeandalucia.es/organismos/turismoculturaydeporte/areas/cultura/bienes-culturales/actuaciones-conservacion/intervenciones/detalle/167853.html> Fecha de acceso 07.11.2023)



6.1 Área de intervención: Tumba de Postumio y Tumba de las Tres Puertas en la Necrópolis de Carmona

La Necrópolis de Carmona es uno de los yacimientos arqueológicos más significativos del sur de España, que data de los siglos I y II de nuestra era (Sanchez-Moral et al. 2018). En esta época cremación era el ritual de enterramiento más extendido, por eso la Necrópolis principalmente consiste de tumbas subterráneas de carácter familiar a las que se accede por un pozo rectangular. Las tumbas tienen una o varias cámaras, decoradas con pinturas y con nichos en las paredes, donde se guardaban las urnas funerarias. Junto a ellas se puede ver otros variantes de estructuras funerarias como bustum (tumbas realizadas en el mismo lugar donde se ha realizado la cremación) o modelo de tumbas de configuración más compleja, en las que el pozo rectangular de acceso está sustituido por grandes patios abiertos hundidos en la roca (Rodríguez Temiño 2014) (Imagen 24).



Imagen 24: Ubicación del Conjunto Arqueológico de Carmona al respecto de la ciudad ([Visor Cartográfico - Conjunto arqueológico de Carmona \(museosdeandalucia.es\)](#) Fecha de acceso: 22.11.2023)

El descubrimiento de la Necrópolis tuvo lugar entre 1868-1869, por la causa de obra del denominado camino del quemadero, que seguía el itinerario de la vía Augusta, en su dirección a Sevilla, también conocida como Arrecife (Rodríguez Temiño 2014). Al principio el proceso de excavación del yacimiento era poco controlable, pero con la creación de la Sociedad Arqueológica de Carmona las excavaciones se sistematizaron (Sanchez-Moral et al.2018).

Así, el 24 de mayo de 1885 se inauguró la Necrópolis Romana de Carmona. Los copropietarios del yacimiento Juan Fernández López y George Bonsor contribuyeron a la promoción de la visita pública, gracias a su iniciativa la Necrópolis de Carmona fue el primer yacimiento en musealizarse en España y después se convirtió en uno de los principales destinos turísticos de la península. También cabe señalar la construcción de un museo que fue el primer museo de sitio construido en España (Rodríguez Temiño y Ruiz Cecilia 2017)

La Necrópolis Romana de Carmona era iniciativa de carácter privado hasta que en 1930 ha sido puesto bajo administración estatal. En 1931 se reconoció como Monumento Nacional y posteriormente en 1984 se transfirió a la Junta de Andalucía, que cambió su nombre al de Conjunto Arqueológico de Carmona en 1993. La institución se trata de protección, conservación, investigación y mantenimiento del yacimiento arqueológico. En 2003 el Conjunto fue declarado como Bien de Interés Cultural (BIC), con la categoría de Zona Arqueológica.

Hoy en día el Conjunto Arqueológico de Carmona consta de museo, donde se exponen los bienes muebles hallados en las excavaciones de la Necrópolis, sede administrativa de la institución, zona arqueológica de aproximadamente 60 000 m² que representa complejos funerarios de la ciudad romana de Carmona, un anfiteatro de finales del siglo I y dos canteras de época romana; archivo y biblioteca. (Rodríguez Temiño y Ruiz Cecilia 2017)

– Tumba de Postumio

Tumba de Postumio es una tumba colectiva, que combina enterramiento de inhumación y nichos para urnas funerarias (Benavente et al 2011). Su tipo de planificación ha sido denominado como «tipo singular» (Rodríguez Temiño et al. 2012) ya que el acceso a la cámara funeraria se realiza a través de un patio abierto excavado en la roca, en el cual todavía se encuentran las huellas del quemadero o "ustrinum". El patio es de planta rectangular, con dimensiones 6 x 4,65 x 4,40 m, tiene una escalera en la pared oeste y un altar

excavado en la esquina. La cámara funeraria también tiene la forma rectangular, con dimensiones 2,05 x 2,10 m, se determina por sus pinturas que aún se conservan (Imágenes 25, 26) (Sin autor. Espacios singulares).

Imagen 25: Tumba de Postumio (izquierda) y vista aérea de la tumba (area marcada representa el volumen subterráneo de la tumba).



Imagen 26: Acceso a la Tumba de Postumio (izquierda) y la vista desde escalera al muro oriental de la tumba (derecha).



– Tumba de Tres Puertas

La tumba de Tres Puertas se encuentra junto a la Tumba de Postumio (Imágenes 27, 28) y se caracteriza por su configuración compleja. La tumba se divide en tres cámaras, cuya altura no supera dos metros. El acceso se realiza a través de la escalera, orientada a suroeste, también tiene otra entrada que no está expuesta al sol directo, orientada a este (Sanchez-Moral et al. 2018).

Imagen 27: Tumba de Tres Puertas con la cubierta existente (izquierda) y vista aérea de la tumba (area marcada representa el volumen subterráneo de la tumba) (derecha).



Imagen 28: Acceso a la Tumba de Tres Puertas.



6.2 Proceso de alteración

Desde su descubrimiento el Conjunto Arqueológico de Carmona ha sufrido varias intervenciones, la mayoría de los cuales han potenciado su deterioro. En 2007-2009 fue realizada una investigación durante la cual fueron detectados causas de alteración de las tumbas de la Necrópolis, que incluye tanto factores relacionados con propiedades de la roca y condiciones climáticas, como factores antrópicos provocados por la excavación original y trabajos de adaptación de yacimiento arqueológico para visitas turísticas (Sanchez-Moral et al. 2018).

Ante todo, cabe señalar que como en cualquier excavación arqueológica los restos de Necropolis de Carmona fueron expuestos al cambio significativo de las condiciones medioambientales, que conlleva a desestabilización del microclima de las tumbas, produciéndose su deterioro (Rodríguez Temiño y Ruiz Cecilia 2015)

Además, la Necrópolis fue construida en una antigua cantera romana, el lugar de reservas de calcarenita altamente porosa, fácil de erosionarse (Sanchez-Moral et al. 2018). Por lo tanto, el principal proceso de alteración de las tumbas de la Necrópolis es "arenización" o pulverización de la superficie de la roca, seguido por desintegración y liberación de los granos de cuarzo, lo que lleva a la pérdida de cemento calcítico de la roca (Ariño y Saiz-Jimenez 1997)

También la pérdida de hallazgos está relacionada con procesos húmedos – en particular, filtración de agua, alta humedad y sistema de drenaje inadecuado. Esto se debe en parte a las medidas tomadas en la excavación original. La tierra extraída de las tumbas reutilizaron para montar isletas a su alrededor y así generaron un jardín artificial que contribuyó a la presentación y visitas públicas del yacimiento. Resulta que estas jardineras absorben agua durante la estación lluviosa, el agua se transmite por capilaridad a la roca de forma higroscópica, manteniendo alta la humedad relativa (Rodríguez Temiño y Ruiz Cecilia 2015)

A pesar de las condiciones climáticas secas, en la época de invierno las lluvias inundan las tumbas, lo que impide drenaje natural (Sanchez-Moral et al. 2018). El agua produce un ciclo de condensación y evaporación lo que conlleva cristalización de las sales y disolución del carbonato que cementa la calcarenita de la roca (Rodríguez Temiño y Ruiz Cecilia 2015). La alta humedad en las superficies verticales de las tumbas también favorece a colonización de bacterias, algas y hongos causando biodeterioración (Sanchez-Moral et al. 2018).

6.3 Estudio visual del terreno. Modelo del contorno

La Tumba de Postumio y la de Tres Puertas forman parte del Conjunto Arqueológico de Carmona que se encuentra integrado al recinto urbano de la ciudad, rodeados de un jardín artificial. El acceso se realiza a través de la ruta de visita turística del conjunto arqueológico, encontrándose la entrada de esta en la parte sur del yacimiento. La tumba de Tres Puertas esta protegida con una estructura metálica, cubierta de chapa y apoyada sobre unos dados de hormigon situados en los restos y, aunque ya posee una cubierta, se propone desarrollar una común para ambas tumbas (Imagen 29).



Imagen 29: Tumba de Postumio y Tumba de Tres Puertas (vista exportada de Google maps)

En primer lugar se ha decidido crear un modelo del yacimiento simplificado. El modelo se desarrolla en base al levantamiento tridimensional de las tumbas que proporciona el Sistema de Información del Conjunto Arqueológico de Carmona (SICAC) y las mediciones realizadas. (Imagen 30)

Así el área de intervención tiene una configuración irregular y un área total de $\approx 43,9$ m². El terreno es de relieve irregular. La estructura del yacimiento, por su caracter subterráneo, casi no se eleva por encima del suelo (Imagen 31).

Imagen 30: Modelo del yacimiento arqueológico realizado en Rhinoceros

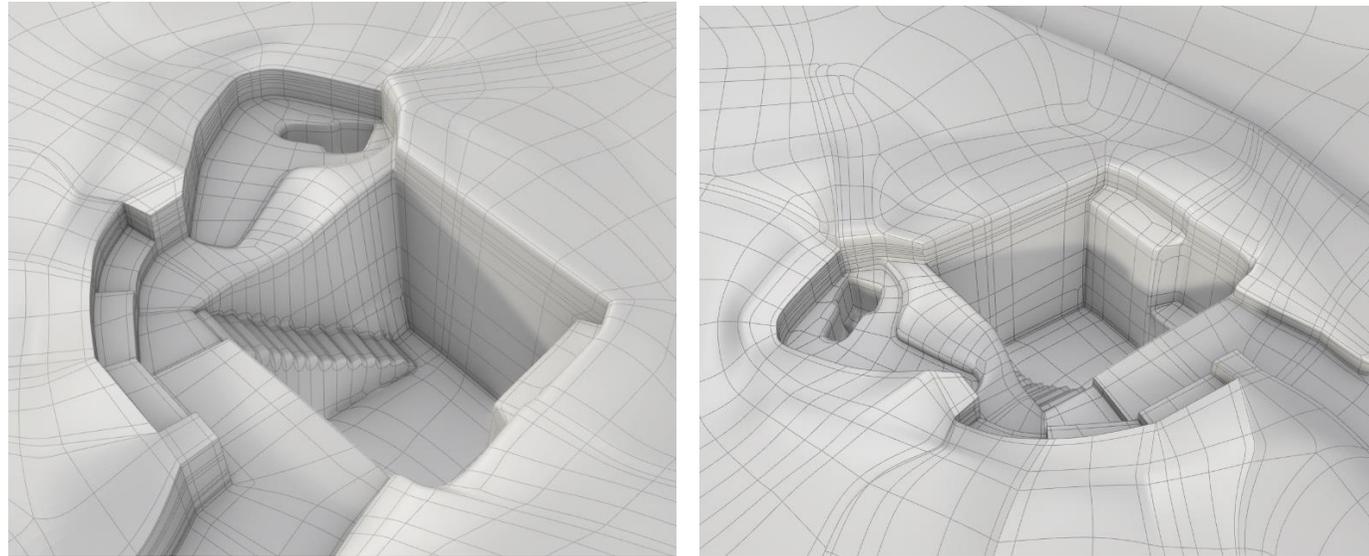
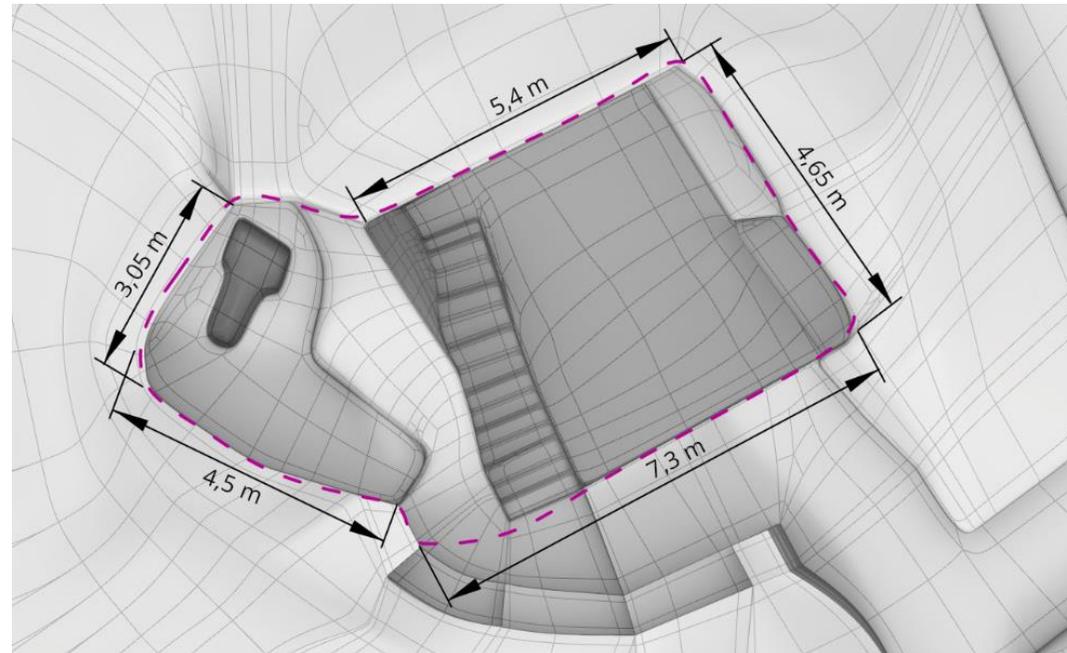


Imagen 31: Perímetro del área de intervención



6.4 Búsqueda de geometría de la cubierta

Al estudiar los procesos de alteración del yacimiento (apartado 6.2) se determinan unos criterios de diseño para la cubierta de protección. Una de las principales causas de deterioro es la entrada de agua que provoca la destrucción del material de las tumbas y mantiene la humedad alta produciendo un desbalance en el microclima del yacimiento. Para evitar estos procesos se considera necesario aportar el control de entrada agua introduciendo un sistema de drenaje adecuado y permitiendo la ventilación natural. Otra causa de deterioro es la entrada de luz solar excesiva que también afecta a la estabilidad de microclima causando el aumento de la temperatura y junto con la humedad provoca el crecimiento de bacterias y vegetación innecesaria. Por lo tanto se debe garantizar una protección completa contra la radiación solar.

Según los criterios de diseño relacionados con las causas de deterioro, se hace la primera aproximación a la geometría de la cubierta (Tabla 1).

Causas de deterioro	Criterios de diseño	Definición de geometría
Radiación solar, entrada de agua, humedad alta, microclima inestable	Protección de condiciones ambientales	Area de la superficie de la cubierta debe ser suficiente para proteger los yacimientos de la lluvia y la luz solar
	Introducción del sistema de drenaje	Geometría que permite capturar y dirigir de forma segura el agua desde el área protegida
	Regulación del clima	Generar máxima sombra aplicando elementos verticales para la protección de la luz solar, promover la ventilación natural, permitir condiciones optimas de iluminación

Tabla 1: Conexión de los criterios de diseño relacionados con las causas de deterioro y definición geométrica.

En el proceso de trabajo se optó por una forma curvada, semejante a una cupula. Se propone generar la geometría de la cubierta a partir de una base cuadrada a través de arcos perimetrales y dos arco centrales cruzados (Imagen 32). Dicha geometría proporciona una protección contra la exposición directa al sol y la lluvia, además de permitir la evacuación del agua y habilitar una ventilación natural.

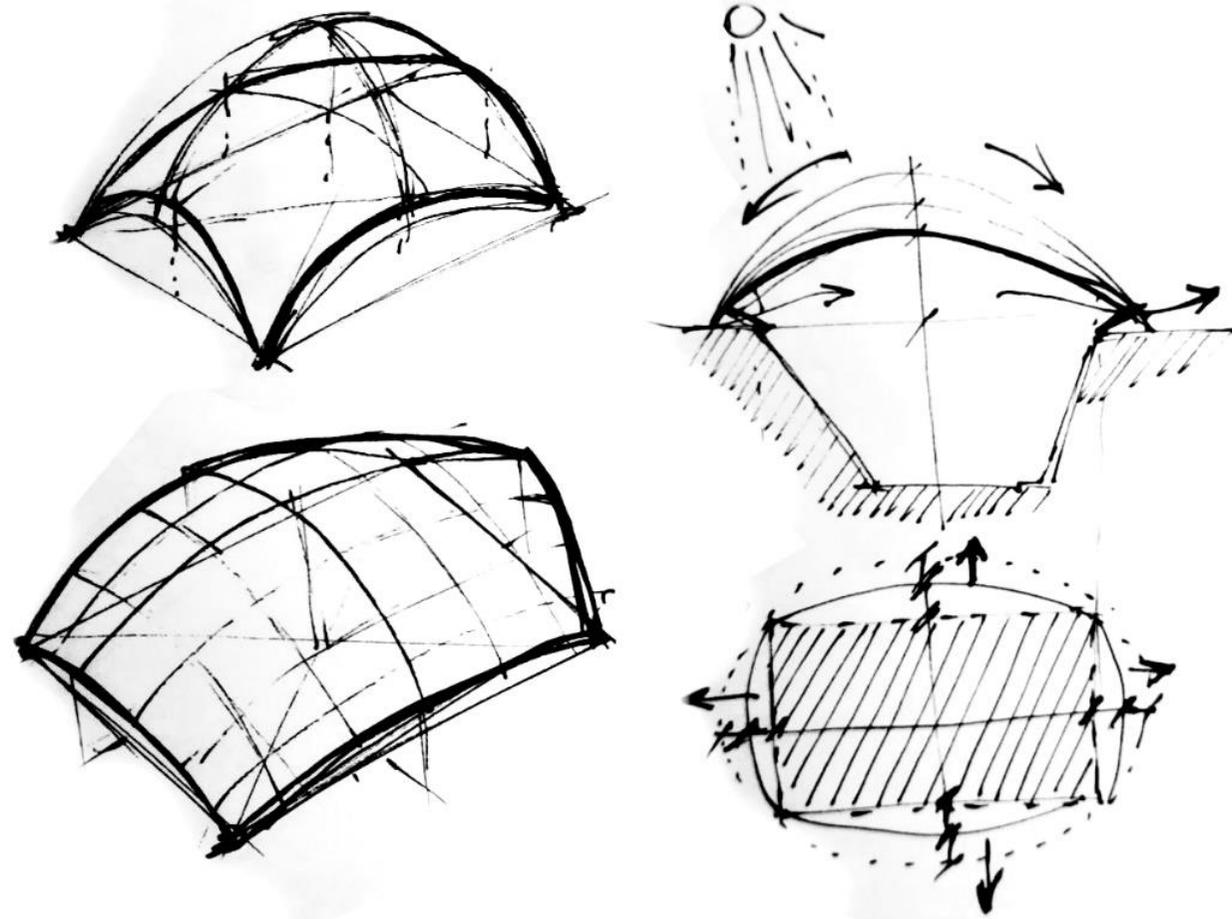


Imagen 32: Primeras aproximaciones a la geometría de la cubierta

6.5 Definición y modelización paramétrica de la cubierta

En cuanto se ha decidido la forma aproximada de la cubierta, definimos parámetros de diseño que pueden ser variables y nos permitirán controlar y modificar la geometría original, y después pasamos a modelización paramétrica mediante las herramientas Rhinoceros y Grasshoper.

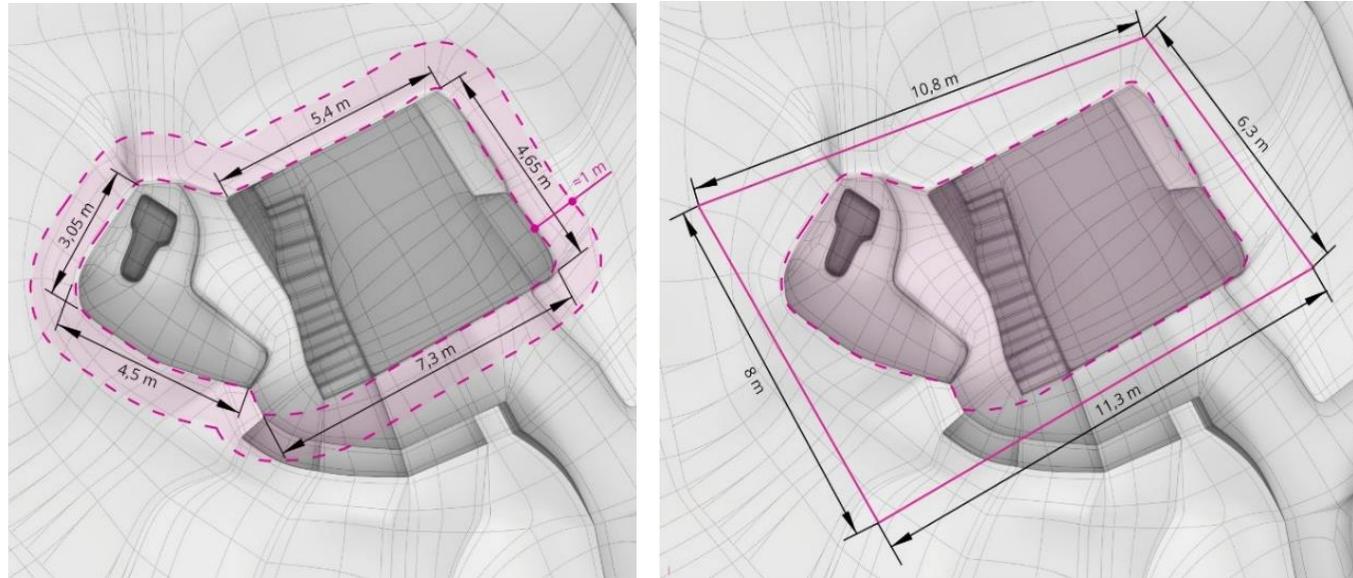


Imagen 33: Definición del perímetro de cubrición

Así, primeramente, determinamos area de cubrición, apartando aproximadamente 1 metro del borde del yacimiento. El perímetro designado servirá como base de la cubierta. Teniendo en cuenta el carácter irregular del terreno, las vértices de la base tienen altura diferente. Las dimensiones de la base como altura de sus vértices serán unos parámetros fijos, para facilitar el proceso de diseño (Imagen 33).

Para generar la superficie de la cubierta se ha dividido cada lado de la base por la mitad para obtener los puntos medios. A continuación, se han creado unos arcos perimetrales a través de los vértices de la base cuadrangular ($b1$, $b2$, $b3$, $b4$) y los puntos medios ($a1$, $a2$, $a3$, $a4$) proyectados a lo largo del eje Z.

Después se ha creado otra serie de arcos centrales cruzados mediante los puntos (a_1, a_2, a_3, a_4) y un desplazamiento en dirección Z centroide de la base. Los arcos formados se dividen en dos grupos según su dirección y mediante el componente «Network Surface» se genera la superficie inicial de la cubierta (Imagen 34).

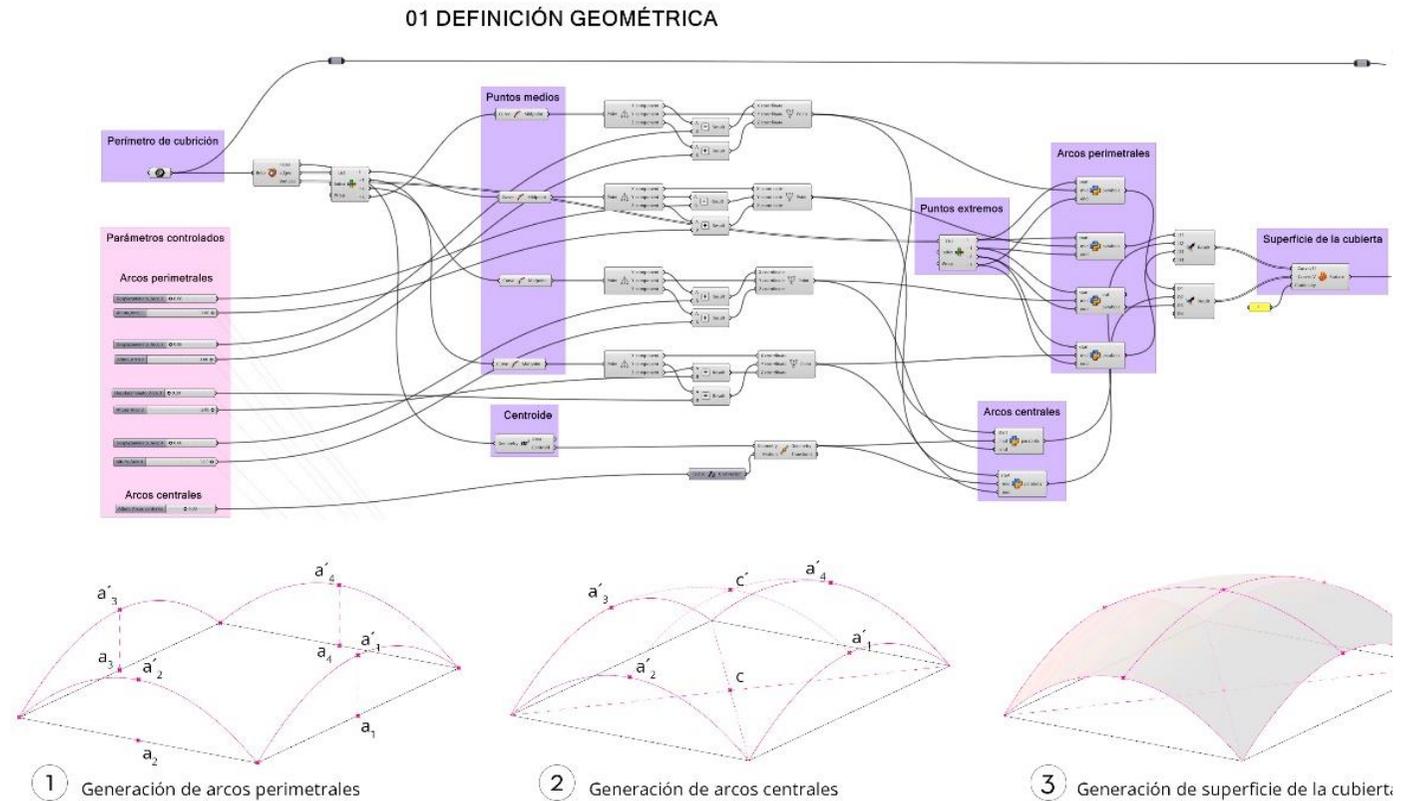


Imagen 34: Generación de la geometría de la cubierta

Como parámetros variables se han definido la artura de los arcos perimetrales y el punto de intersección de los arcos centrales. También se decidió introducir como parámetro variable el desplazamiento horizontal de los puntos superiores de los arcos perimetrales. Los valores se controlan de forma paramétrica y sus valores determinarán la forma final de la cubierta.

Y como parametros fijos se proponen el perimetro de cubrición, altura minima de los arcos perimetrales para la ventilacion natural y el acceso de visita al yacimiento.

El control de los valores variables se realiza a traves del componente «Number slider», que permite crear un rango de valores limitar este, introduciendo valores minimos y maximos según las necesidades del diseño. Así, como es necesario organizar un acceso al yacimiento para las visitas turisticas, establecemos la altura minima de 1,3 metros para el arcos perimetral que se encuentra en la vía de acceso. En el caso del resto de arcos perimetrales la altura puede variar entre 1 y 3 metros. Los valores de desplazamiento horizontal de los arcos están acotados entre 0-2 metros. El nivel del punto central de la superficie varia entre 0 y 2 metros. Esta limitación de valores también sirve para reducir el proceso de calculo a la hora de optimizar la superficie de la cubierta. (Imagen 35).

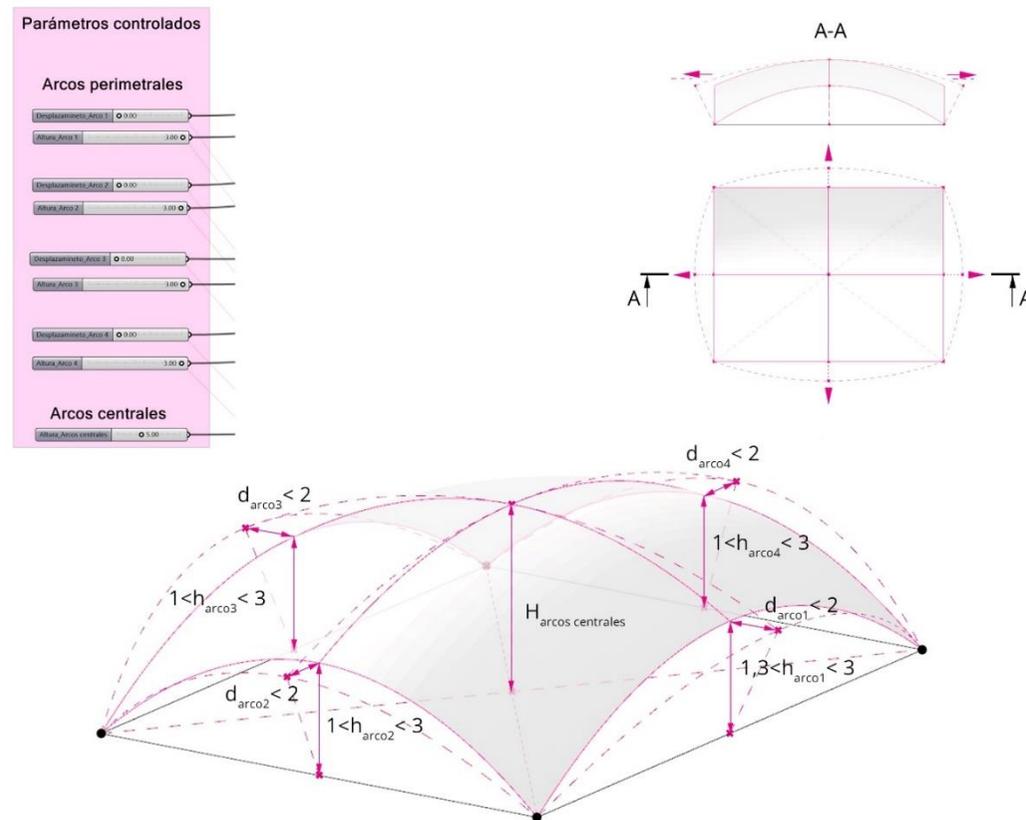


Imagen 35: Parámetros variables de la geometría

6.6 Análisis medioambiental y optimización

El siguiente paso del trabajo consiste en la optimización de la geometría de la cubierta mediante el software de análisis medioambiental y el solucionador evolutivo con el fin de proporcionar una protección de la radiación solar lo más eficiente posible.

Para evaluar las soluciones de diseño realizamos un estudio de sombra y de radiación solar. Para esto se acude a un plugin de análisis medioambiental de Grasshopper – LadyBug. Dicha herramienta permite simular las condiciones climáticas y determinar las zonas del yacimiento que más sufren de la incidencia solar (Imagen 36).

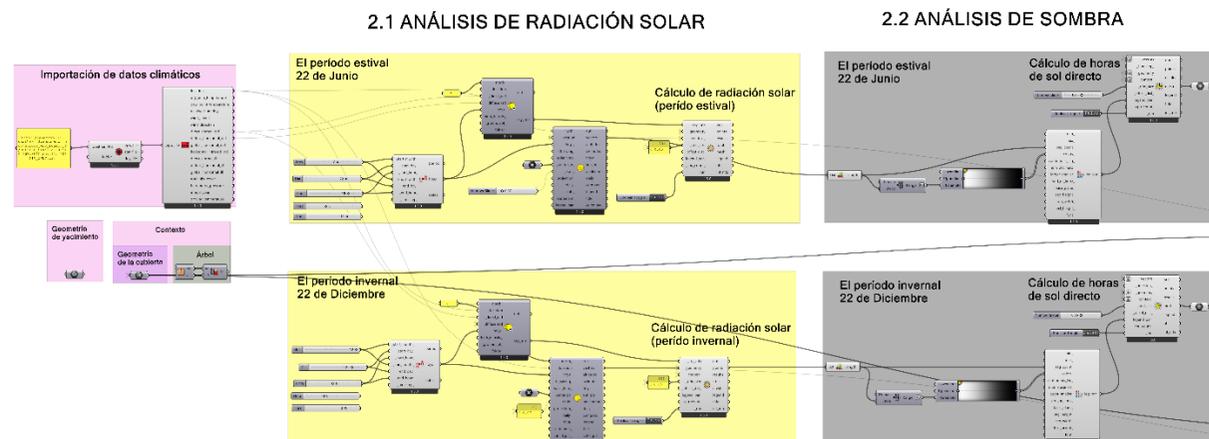


Imagen 36: Realización de análisis de radiación solar y sombra a través de herramientas Grasshopper y LadyBug.

Primeramente descargamos el fichero en formato *.epw* (EnergyPlus Weather) con datos climáticos inherentes al lugar del estudio que importamos a través del componente «LB Import EPW». En nuestro caso usamos los datos climáticos recibidos desde la Estación Meteorológica de Sevilla Aeropuerto. De esta forma, obtenemos la información necesaria sobre la posición de sol y la incidencia de radiación solar.

El yacimiento se sitúa en el Conjunto Arqueológico de Carmona donde predomina el clima mediterráneo, que está caracterizado por altas temperaturas, precipitaciones irregulares y fuerte

insolación. En Carmona los veranos son cortos, cálidos, áridos y mayormente despejados y los inviernos son fríos y parcialmente nublados. La temperatura varía de 4 °C a 36 °C y rara vez baja de 0 °C o sube por encima de 40 °C. Carmona tiene una variación considerable de las precipitaciones mensuales en función de la estación. El mes con más lluvia en Carmona es noviembre. La energía solar de onda corta (incluye luz visible y radiación ultravioleta) incidente promedio diaria tiene variaciones estacionales extremas durante el año. El período más resplandeciente del año es del 11 de mayo al 21 de agosto. El mes más resplandeciente del año en Carmona es julio, con un promedio de 8,1 kWh. ([El clima en Carmona, el tiempo por mes, temperatura promedio \(España\) - Weather Spark](#) Fecha de acceso: 07.11.2023).

Tras definir las condiciones ambientales y la posición del sol realizamos el análisis de radiación solar y sombra, teniendo en cuenta el impacto de vegetación alrededor del yacimiento. Para análisis elegimos el día cuando sol alcanza su mayor altitud - 22 de Junio, y cuando sol esta en su posición más baja - 22 de Diciembre (Imágenes 37-39).

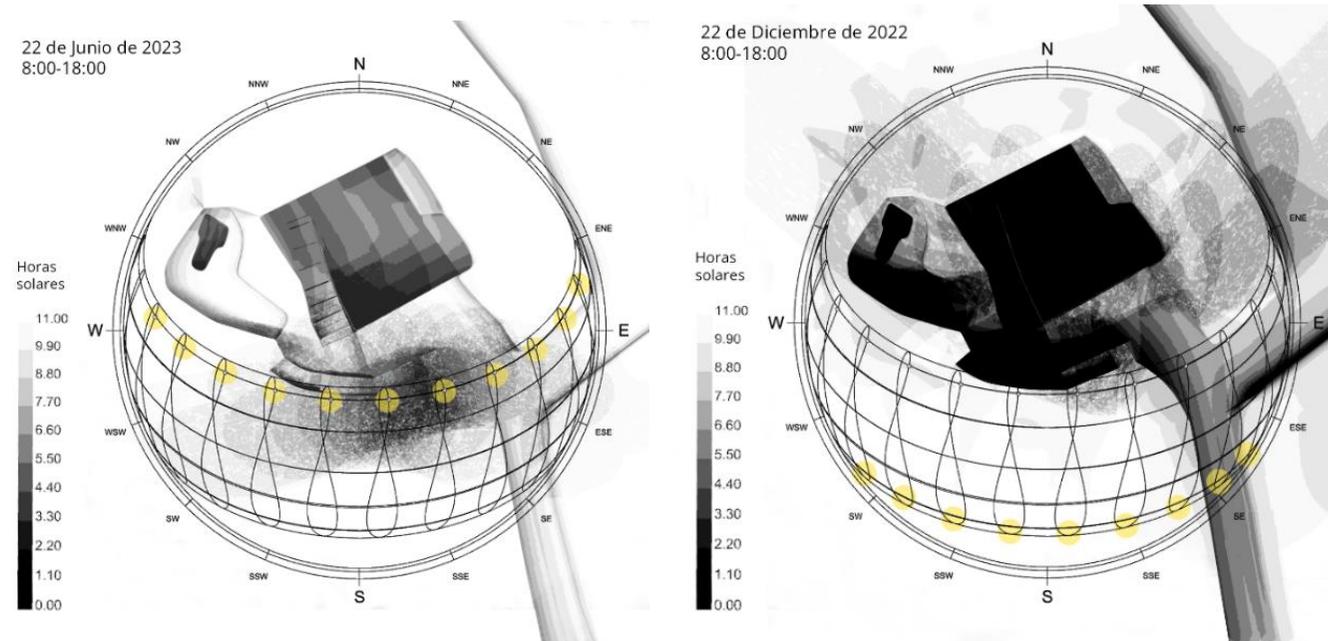


Imagen 37: Tumba de Postumio y Tumba de Tres Puertas. Análisis de sombra durante 22 de Junio de 2022 8:00-18:00 (izquierda) y 22 de Diciembre de 2022 8:00-18:00 (derecha)

Imagen 38: Tumba de Postumio y Tumba de Tres Puertas. Análisis de radiación solar durante 22 de Junio 2022 8:00-18:00

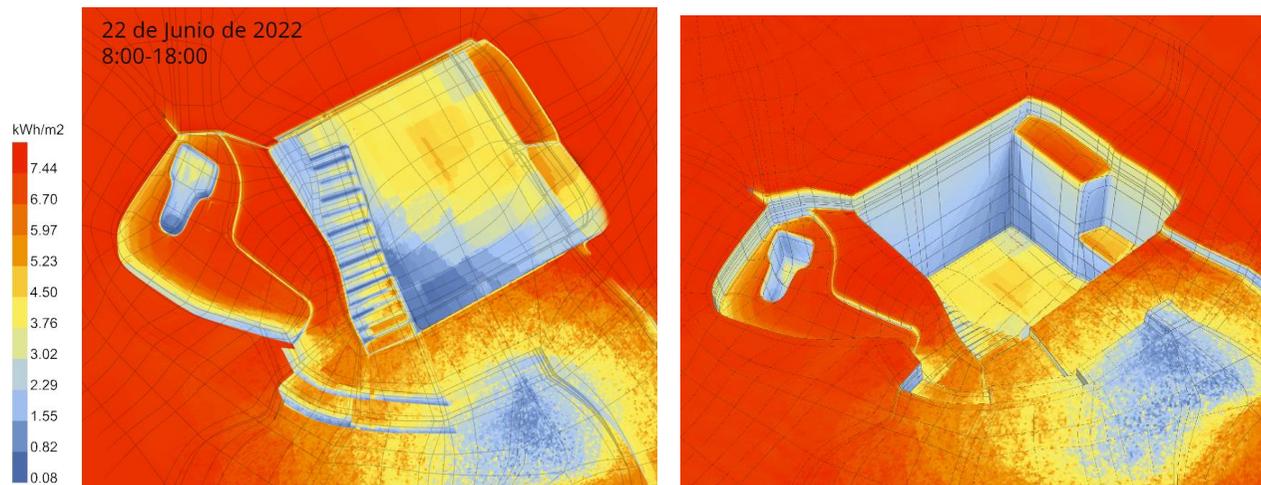
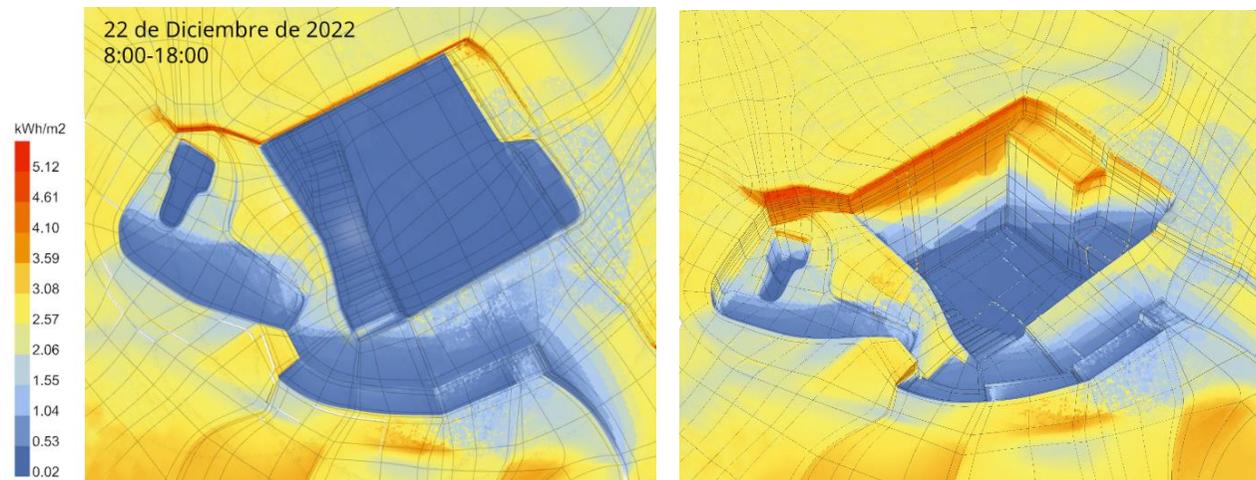


Imagen 39: Tumba de Postumio y Tumba de Tres Puertas. Análisis de radiación solar durante 22 de Diciembre 2022 8:00-18:00



En los graficos obtenidos podemos observar que partes del yacimiento sufren más de la incidencia solar. Así, en el período estival la radiación solar alcanza un valor de 7,44 kWh/m² y las superficies

horizontales del yacimiento están más expuestos al impacto solar, mientras que en el período invernal la mayor parte del yacimiento se encuentra en la sombra y en general el impacto de radiación solar reciben las superficies laterales con valor máximo de 5,12 kWh/m².

6.7 Optimización de la superficie de la cubierta

En este trabajo optamos por una optimización multiobjetiva, por lo tanto como datos de entrada se introducen los parámetros geométricos variables detallados anteriormente en el apartado 6.5 y como objetivos para el algoritmo evolutivo se establece la obtención de la máxima sombra de la cubierta tanto en el periodo estival como en el invernal así como la generación de una forma de la cubierta dirigida a captar la máxima radiación solar con el fin de instalar placas fotovoltaicas (Imagen 40). Para esto, del análisis de sombra realizado en el apartado anterior, extraemos la proyección de la sombra sobre la zona de cubrición en momentos de posición de sol más baja y entonces definimos el valor del área de intersección entre la sombra proyectada y la zona de cubrición como parámetro de objetivo. La obtención de un valor máximo para este valor será la tarea del algoritmo (Imagen 41).

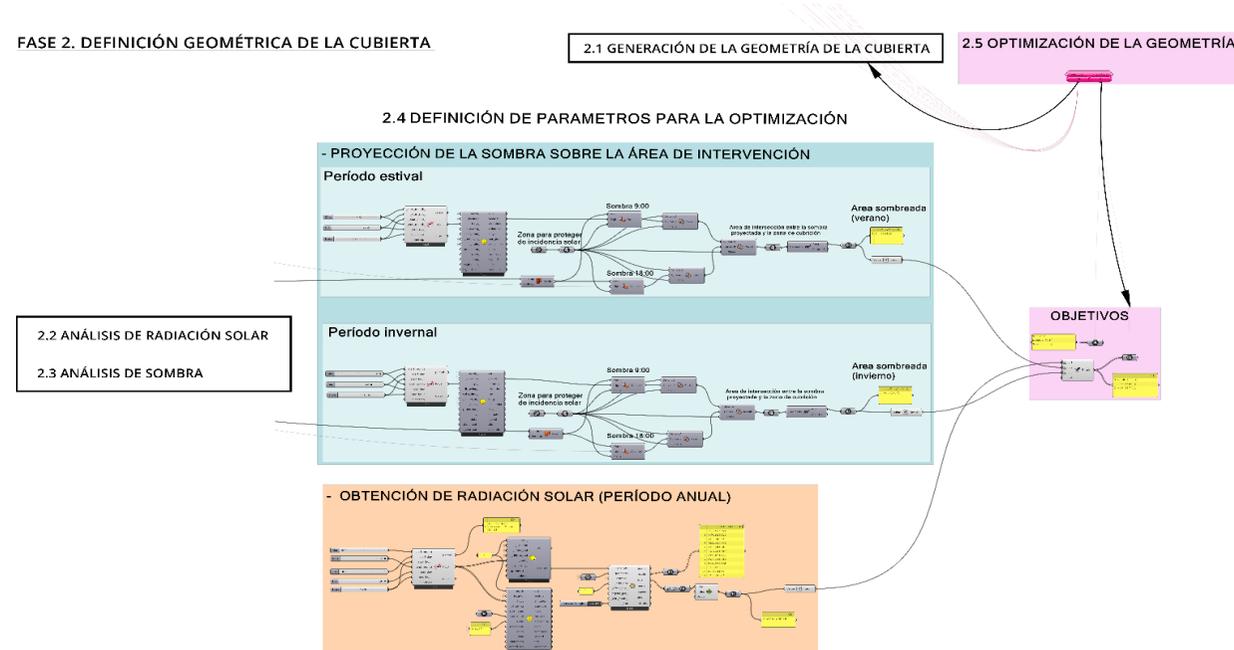
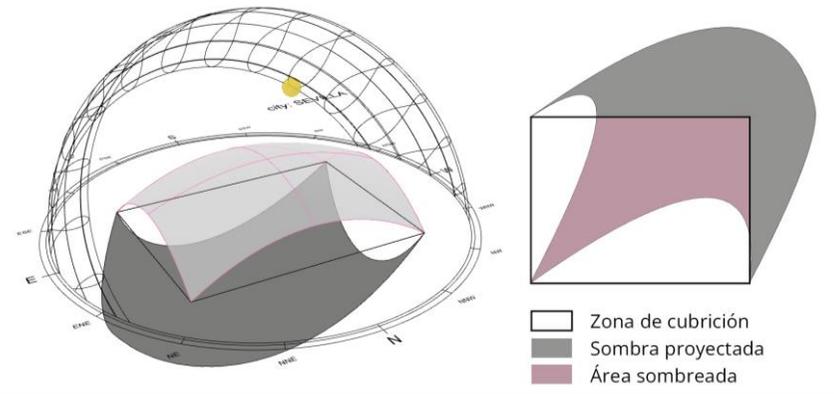


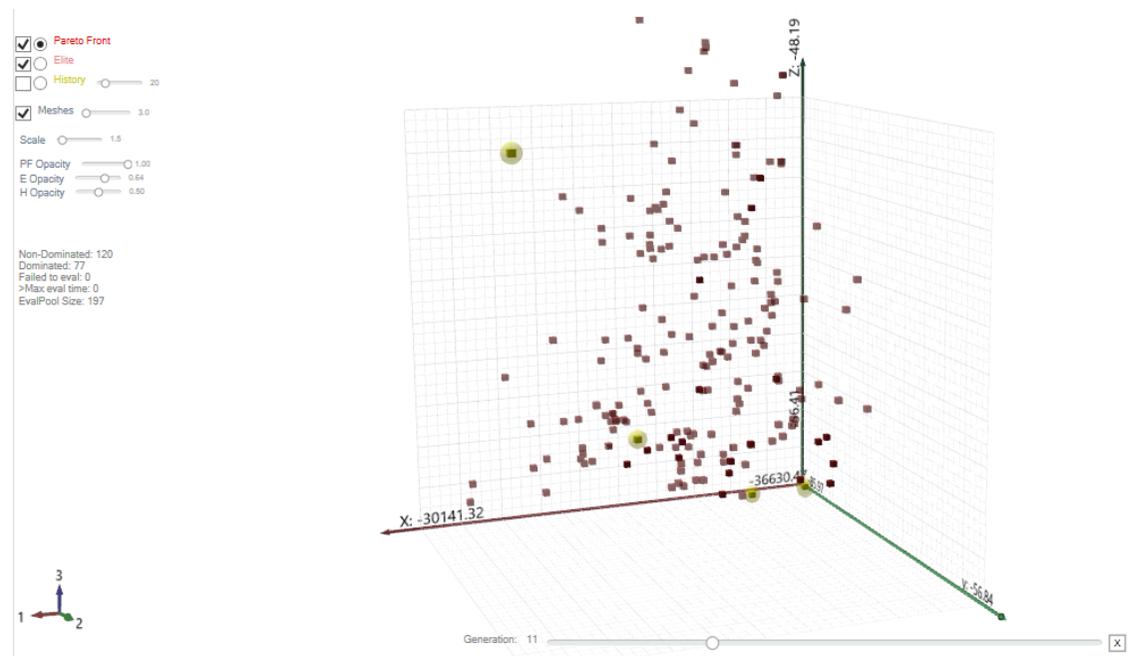
Imagen 40: Optimización de la geometría de la cubierta a través de las herramientas Grasshoper y Octopus.

Imagen 41: Proyección de la sombra de la cubierta sobre la zona de yacimiento.



El resultado de cálculo representa un gráfico tridimensional que muestra la relación entre los parámetros variables y la definición geométrica de la superficie de la cubierta. El eje Z muestra los resultados según el área sombreada en invierno, mientras que el eje Y para el de verano. El eje X representa el valor de radiación solar obtenida por la superficie de la cubierta. El punto del origen de las coordenadas muestra la mejor solución, caracterizada por el equilibrio entre parámetros (Imagen 42).

Imagen 42: Interfaz de optimizador Octopus. Gráfico del proceso de cálculo.



El algoritmo prueba varias combinaciones de parámetros de diseño hasta que encuentra la mejor solución posible. El proceso de cálculo es inicialmente bastante caótico, pero con más interacciones filtra las opciones de diseño y descarta las peores, acercándose progresivamente a una solución de diseño óptima. Los siguientes gráficos muestran las opciones de diseño obtenidas de cada 20-40 generaciones representando el progreso de cálculo (Imagen 1). Las últimas generaciones se caracterizan por cambios de diseño mínimos, siendo progresivamente más difícil distinguir las soluciones propuestas. Con mayor precisión eso observamos en el gráfico de la diversidad de los parámetros variables durante el proceso de optimización. Al principio los parámetros están dispersos por eso el gráfico muestra una gran variedad de combinaciones y al final podemos ver que parámetros procuran acercarse a una combinación óptima (Imágenes 43, 44)

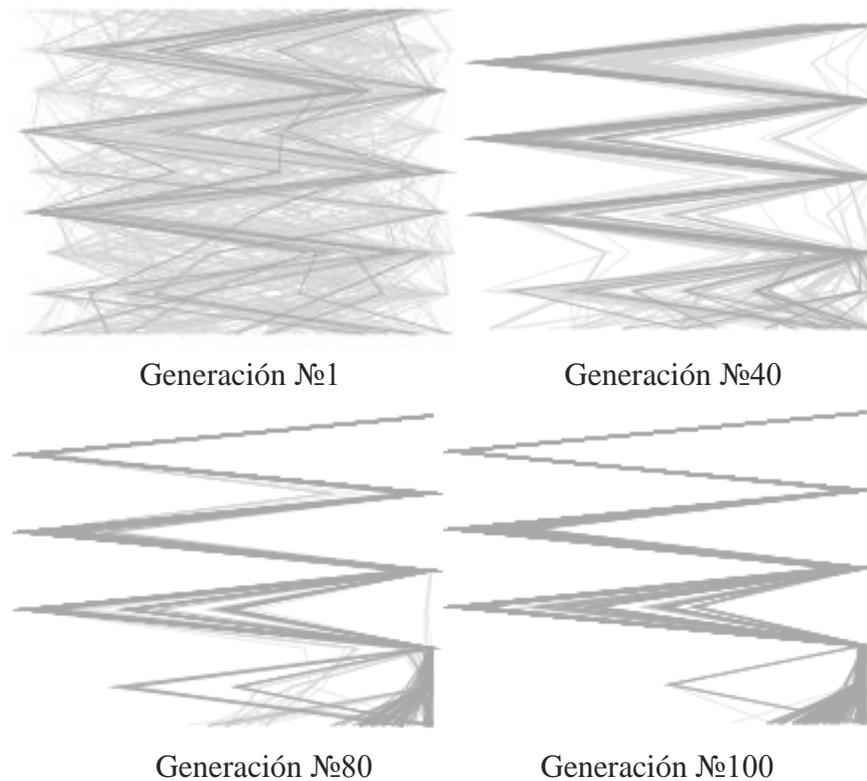
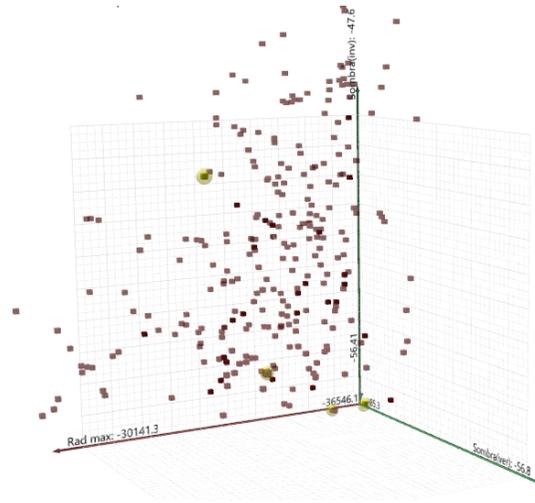
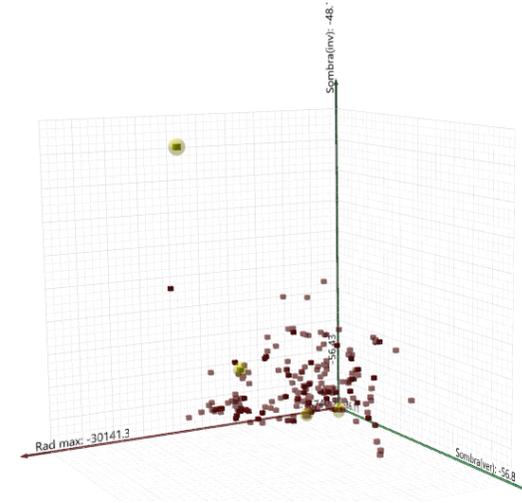


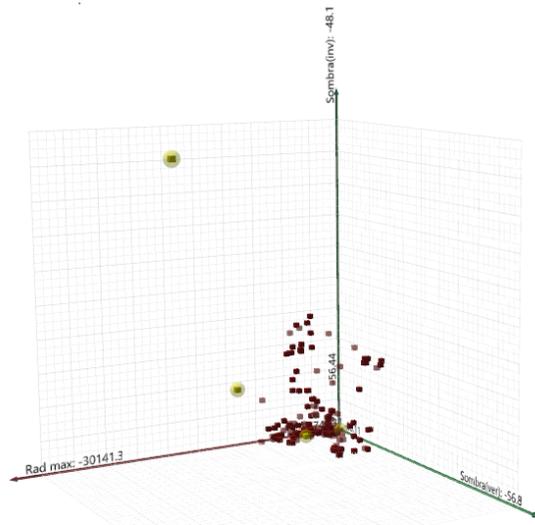
Imagen 43: Diversidad de los parámetros variables durante el proceso de optimización.



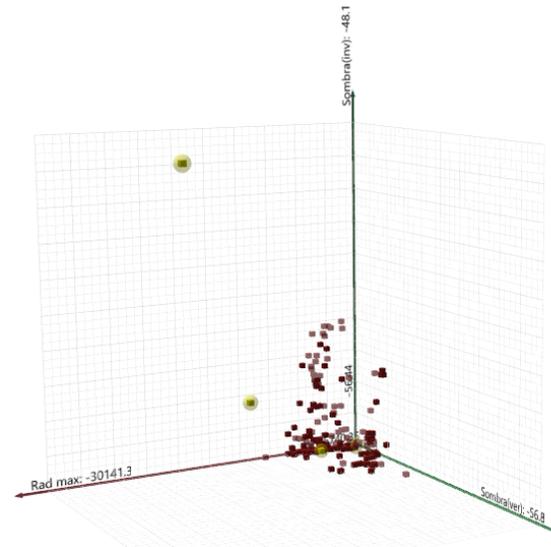
Generación Nº1



Generación Nº40



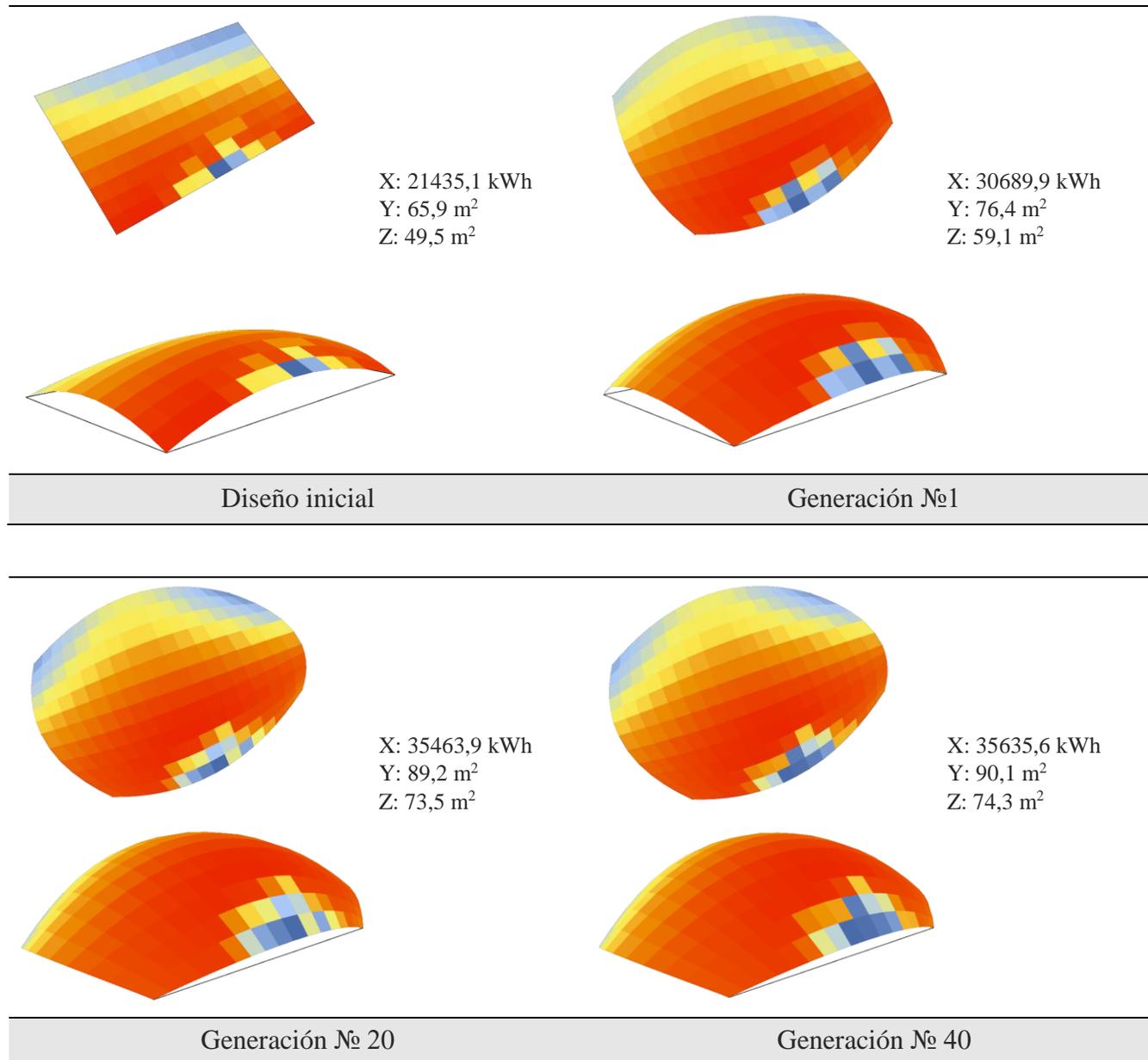
Generación Nº80

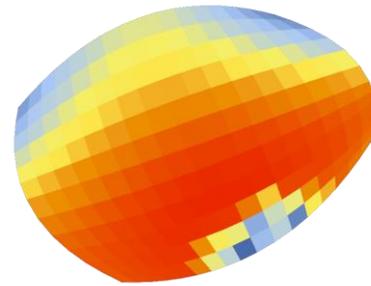


Generación Nº100

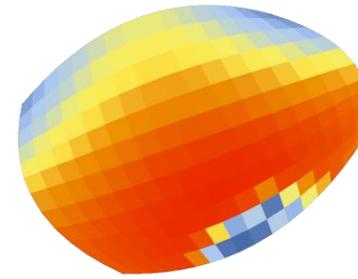
Imagen 44 : Proceso de optimización. Las opciones de diseño tratan de acercarse al punto de origen de las coordenadas

Tabla 2: Comparación visual de las mejores alternativas de diseño de cada 20-40 generaciones

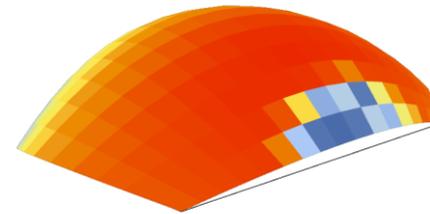
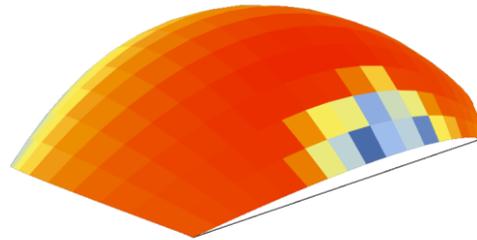




X: 35688,7 kWh
Y: 91,6 m²
Z: 74,3 m²



X: 35557,3 kWh
Y: 92,9 m²
Z: 74,3 m²



Generación № 80

Generación № 100 – Diseño final

Como resultado de cálculo tenemos una serie de opciones de diseño que mejor se adaptan a los objetivos asignados. Analizando las opciones, elegimos la mejor solución según nuestro criterio. Así, obtenemos una superficie de la cubierta con los siguientes parámetros (Tabla 2):

Tabla 3. Parámetros de diseño obtenidos después de la optimización medioambiental

Nombre de parámetro	Valor de parámetro
Altura del arco 1	1,3 m
Altura del arco 2	1 m
Altura del arco 3	2,83m
Altura del arco 4	1,15m
Altura de arcos centrales	1,68
Desplazamiento del arco 1	2m
Desplazamiento del arco 2	2m
Desplazamiento del arco 3	2m
Desplazamiento del arco 4	2m

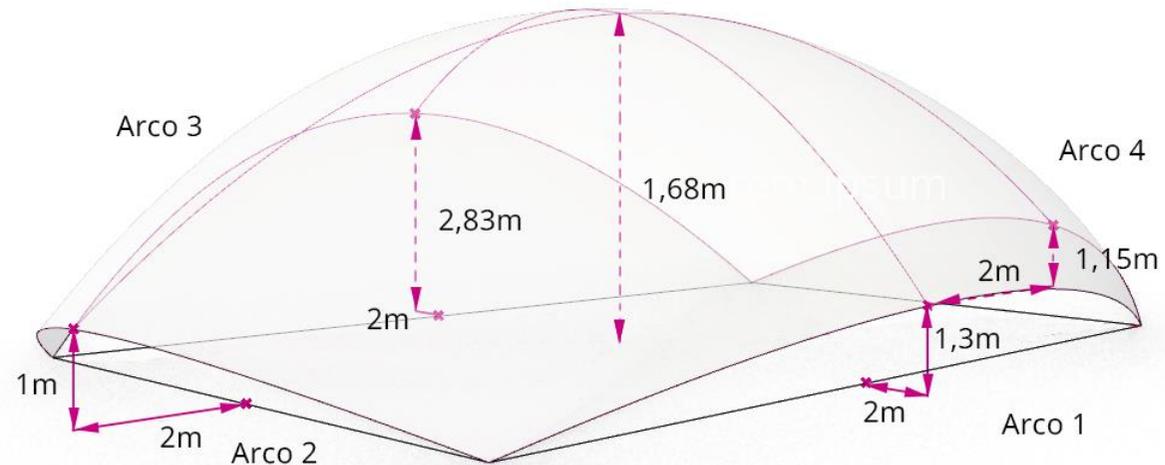


Imagen 45: Visualización de la superficie de la cubierta obtenida después de la optimización

07

FASE III. DEFINICIÓN ESTRUCTURAL Y IMPORTACIÓN DEL MODELO PARAMÉTRICO AL ENTORNO BIM

7.1 Definición estructural

La siguiente parte de trabajo trata la definición estructural. En nuestro caso optamos por una estructura formada por arcos con una envolvente de membrana textil.

La aplicación de las estructuras de textil en el contexto de protección de yacimientos arqueológicos proporcionan una serie de ventajas. En primer lugar, son flexibles en diseño y permiten la adaptación a diferentes condiciones, en nuestro caso es un factor importante. Además, no producen impacto negativo al contorno de yacimientos arqueológicos ya que permiten el uso de estructuras de soporte ligeras y de rápido montaje y desmontaje, son fáciles de mantener y transportar y poseen unas características visuales altas. (Mollaert et al.2011).

Otro factor imprescindible es el control de las condiciones climáticas bajo cubierta. El uso de materiales textiles aporta la regulación térmica, protege de la radiación solar y al mismo tiempo admite iluminación natural debido a su translucidez (Zanelli 2015).

A través de la superficie definida en el apartado 6.7 obtenemos los arcos que a continuación formarán la estructura de la cubierta. Para ello dividimos la superficie en dos direcciones creando un entramado de arcos. La división se realiza de manera que los arcos siempre estén en posición recta para facilitar el proceso de montaje. El número de arcos está parametrizado tanto en dirección U como en dirección V lo que permite cambiar este valor y así modificar la estructura en tiempo real (Imagen 46, 47).

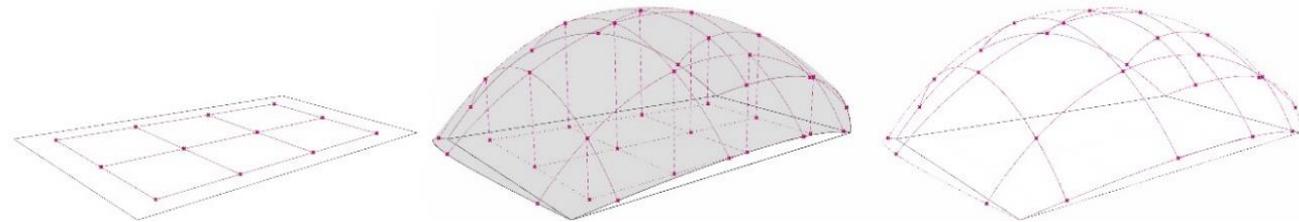


Imagen 46: Generación de entramado de arcos

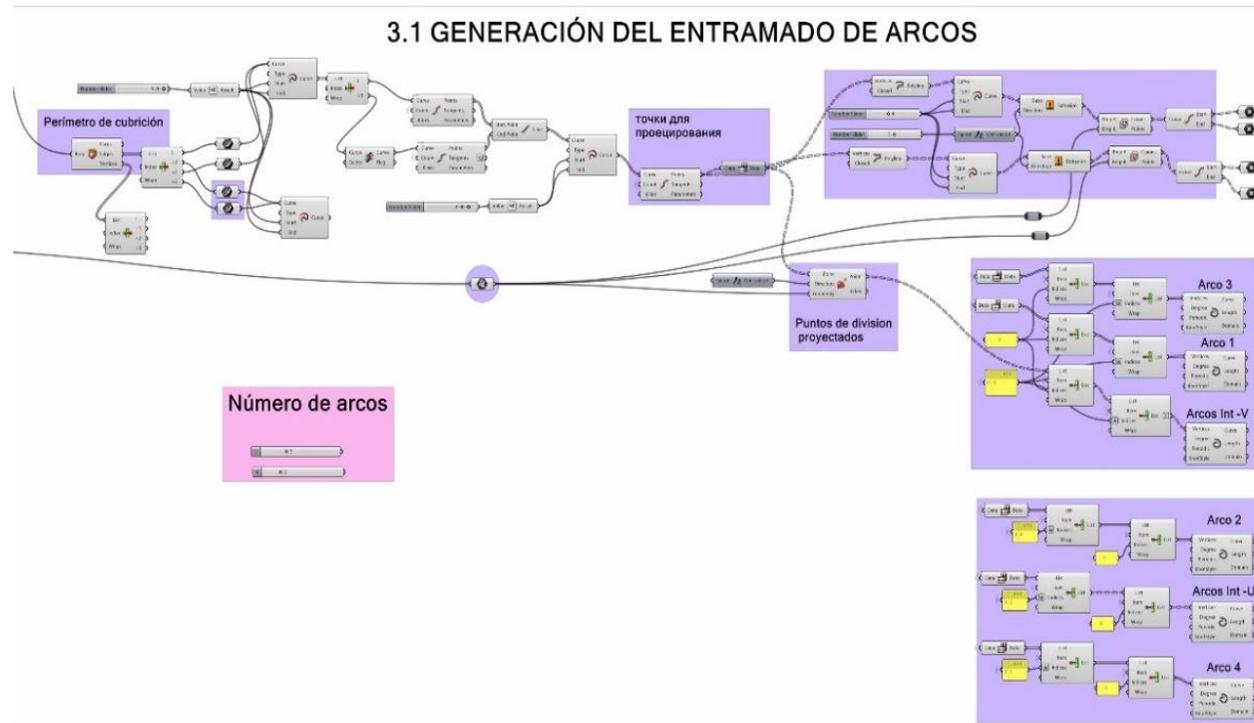


Imagen 47: Generación de entramado de arcos

A continuación al modelo general de entramado asignamos la sección de los elementos estructurales y desarrollamos las uniones. Así, como componente estructural utilizamos perfiles tubulares de acero de 127 mm de diámetro que se conectan entre sí a través de empalme atornillado bridado del mismo diámetro exterior que los tubos. Los arcos principales (en dirección U) están conformados con una sola pieza con un número parametrizado de segmentos perpendiculares soldados, igual en número a los arcos secundarios (en dirección V), que sirven para conectar ambos elementos (Imagen 48).

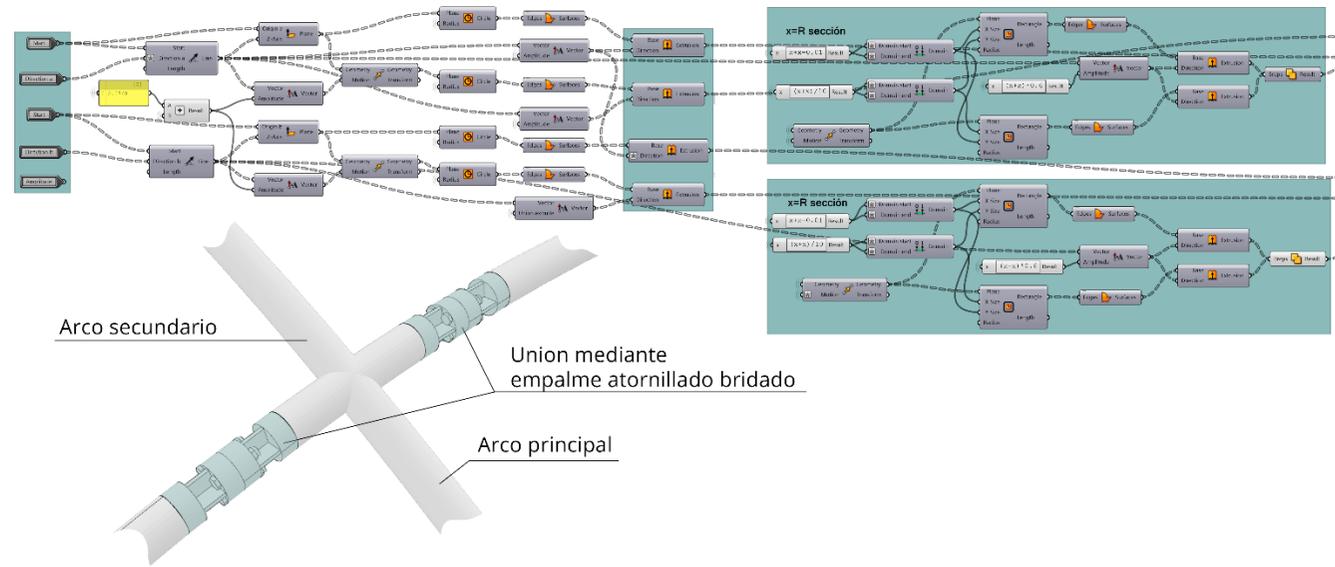


Imagen 48: El proceso de desarrollo de las uniones

Los cuatro vértices de la base rectangular presentan uniones conformadas por barras soldadas que conectan los arcos perimetrales y los elementos de la base entre sí. Para evitar el daño al yacimiento la estructura está anclada a una chapa de acero que se apoya directamente en el terreno. Para aportar estabilidad a la cubierta se utilizan sacos de arena como contrapeso, colocados en la base de la estructura (Imagen 49). La irregularidad del terreno se resuelve homogeneizando el terreno con tierra.

Para la envolvente usamos membrana arquitectónica de PTFE, o politetrafluoroetileno. Es una membrana de fibra de vidrio que es extremadamente duradera y tolerante incluso a los elementos climáticos más extremos. La fibra de vidrio tejida confiere a la fibra de vidrio revestida de PTFE su resistencia mecánica y proporciona a la membrana la máxima flexibilidad.

La conexión de la membrana textil con la estructura se realiza a través de un perfil tubular fijado a lo largo de los arcos perimetrales y unas arandelas predeterminadas en la membrana que permiten enganchar ésta con un cable (Imagen 50).

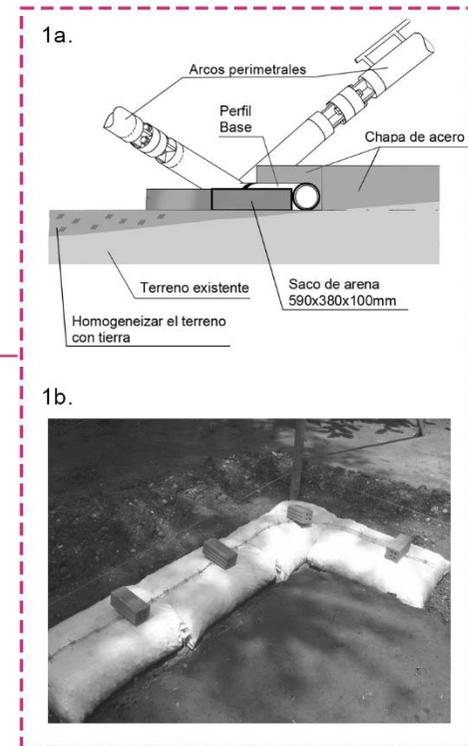
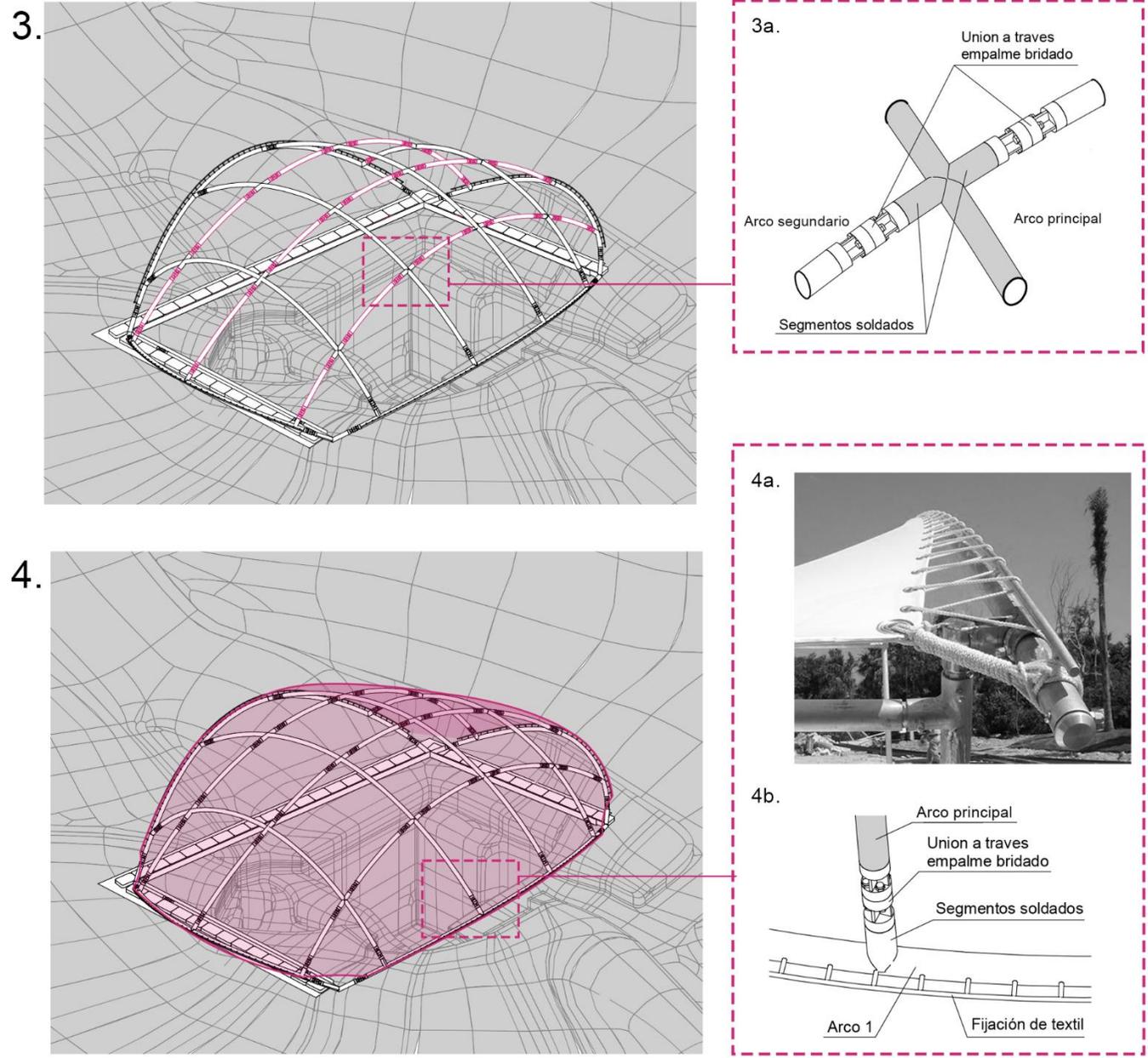


Imagen 49: (1-2) Esquema del proceso de montaje. 1a) Union de los arcos perimetrales y fijación de la base de la estructura. 1b) Ejemplo de construcción con los sacos de arena. 2a) Conexión de los arcos perimetrales con los arcos interiores principales

Imagen 50: (3-4) Esquema del proceso de montaje. 3a) Detalle de conexión de los arcos interiores principales con arcos secundarios. 4a) Fijación de membrana textil 4b) Detalle de elementos de fijación de la membrana textil.



7.2 Importación del modelo de la estructura al entorno BIM

Al definir la estructura, el modelo desarrollado se exportó al Revit un software BIM (Building Information Modeling) mediante el complemento «Rhino.Inside.Revit». Para eso exportamos cada elemento estructural por separado asignando sus propiedades como el nombre, la familia, la categoría, tipo de material y dimensiones (Imagen 51). Asignación de las propiedades permite guardar y la información sobre el proyecto adecuadamente, facilita el análisis de esta información desde diferentes perspectivas como diseño, materialidad, presupuesto y ect.

A continuación formalizamos el proyecto: desarrollamos planos, vistas y cortes de la cubierta (Imagen 52).

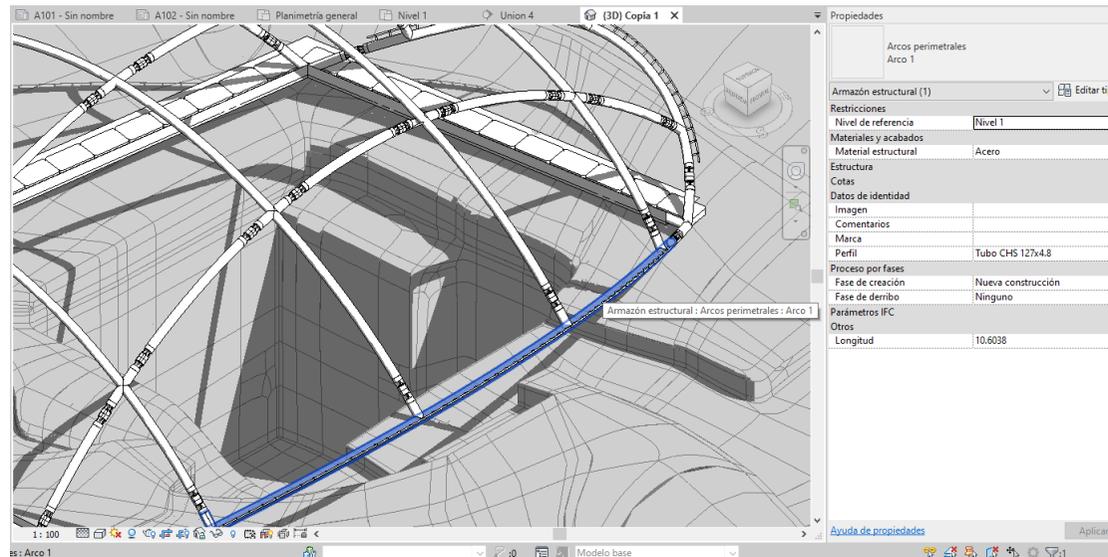
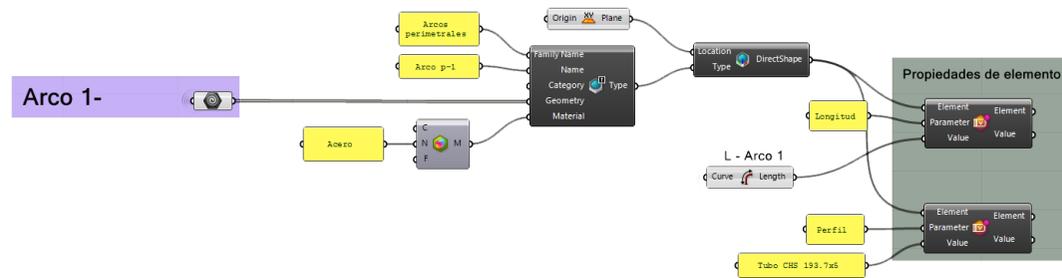


Imagen 51: Importación del modelo paramétrico de la cubierta al Revit mediante el complemento «Rhino.Inside.Revit». Asignación de las propiedades de los elementos constructivos.

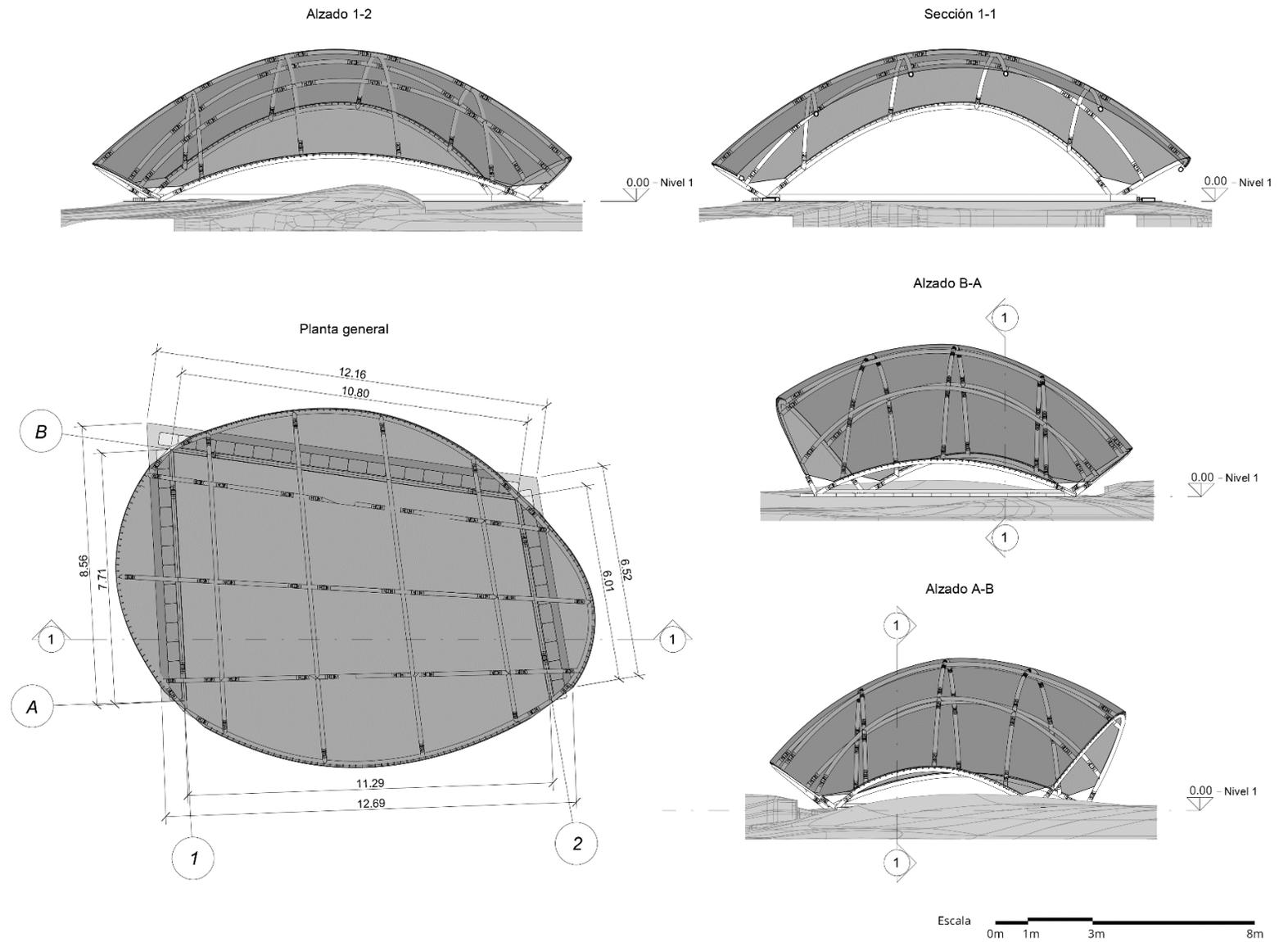


Imagen 52: Planta general, vistas y sección de la cubierta exportados de Revit.

7.3 Discusión de resultados

Según los resultados obtenidos anteriormente podemos analizar el comportamiento de la cubierta propuesta en el yacimiento estudiado. Y con ese fin realizamos el análisis de sombra y radiación solar antes y después de la instalación de la cubierta (Imágenes 53-54).

Imagen 53: Tumba de Postumio y Tumba de Tres Puertas. Análisis de radiación solar antes y después de instalación de la cubierta durante el período estival (22 de Junio 2022 8:00-18:00)

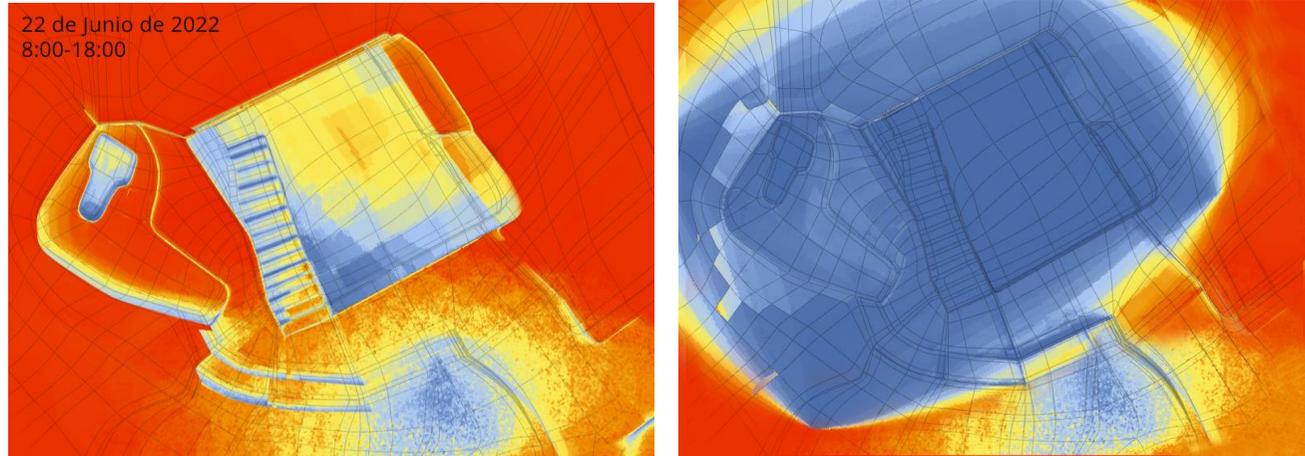
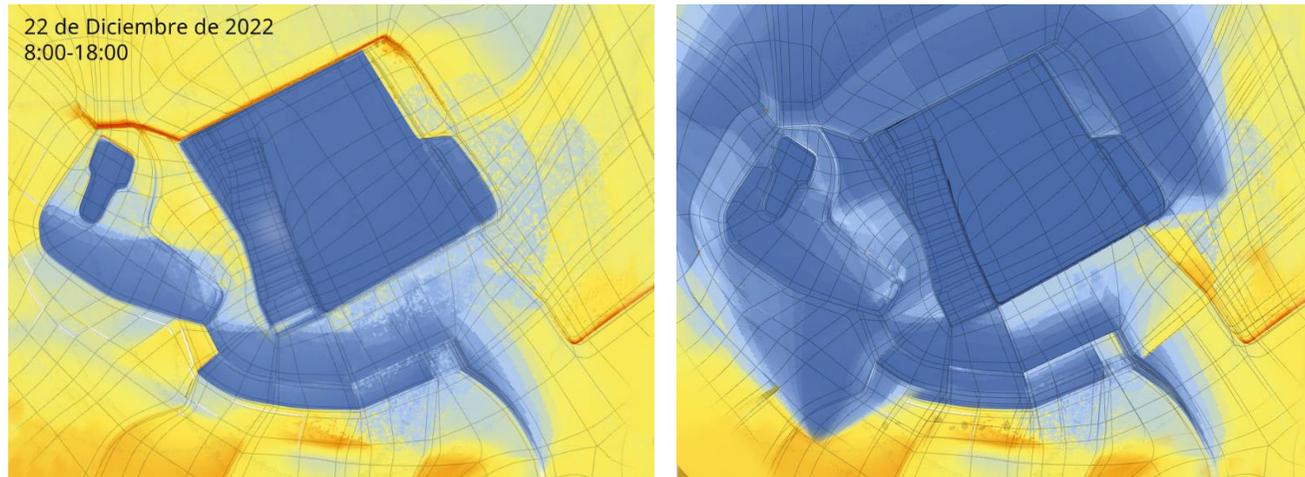


Imagen 54: Tumba de Postumio y Tumba de Tres Puertas. Análisis de radiación solar antes y después de la instalación de la cubierta durante el período invernal (22 de Diciembre 2022 8:00-18:00)



En el análisis comparativo se observa una mejora significativa de las condiciones climáticas. Después de la instalación de la cubierta el yacimiento se encuentra en la sombra a lo largo del día tanto en el período estival como en el período invernal. El valor máximo de radiación solar obtenido por la superficie del yacimiento se redujo a un 87,8% en verano (de 6,7 kWh/m² a 0,82 kWh/m²) y 88,5% en invierno (de 4,6 kWh/m² a 0,53 kWh/m²).

Sin diferencia el período del año durante las horas de posición de sol alta (11:00-14:00 h) se produce una sombra más corta y en este caso casi cualquier cubierta puede proporcionar una protección total. Sin embargo, en las horas de posición de sol baja las superficies laterales de las tumbas siguen afectadas por la radiación solar.

Si se compara la propuesta de la cubierta inicial y la propuesta final optimizada a través de algoritmos genéticos se puede observar que la propuesta final garantiza la protección contra incidencia solar tanto en las horas de posición de sol alta como baja. Además, genera un área sombreada sobre el yacimiento durante todo el año, un 44,6% más que el diseño inicial. El valor máximo de la radiación solar obtenida por la superficie del yacimiento disminuye en un 42,5% en verano y en 21,1% en invierno con la cubierta instalada.

En la parte de definición estructural seguimos los criterios de la protección de yacimientos arqueológicos. Por lo tanto hemos basado en un sistema constructivo ligero - una estructura de acero con una envolvente de membrana textil. Las uniones se han desarrollado de manera que contribuye al proceso de montaje rápido, facilita la transportación de los elementos constructivos. La base de la estructura no requiere la perforación en el terreno, lo que evita el daño en el yacimiento. La envolvente de membrana textil proporciona flexibilidad de geometría, protege de la radiación solar y al mismo tiempo permite la entrada de luz lo que favorece a las visitas públicas.

En general la cubierta propuesta ofrece una protección completa y favorece a la conservación de los restos, pero hay que tener en cuenta que el sistema de cubrición desarrollado posee margen de mejora. En el caso de estudio, aunque tiene un terreno irregular, el desnivel de los puntos de apoyo no era muy significativo lo que nos permitió actuar a partir de una base rectangular plana. En el futuro habrá que analizar el comportamiento de la cubierta ante un terreno más complejo. En función de las necesidades de protección, las condiciones climáticas y la orientación de los restos la cubierta puede requerir de la incorporación de elementos de protección adicionales, por ejemplo algunos elementos laterales para producir más sombra.

8.1 Conclusiones

Finalmente, durante este trabajo hemos desarrollado y aplicado un método de diseño para estructuras ligeras basado en el diseño paramétrico, el análisis medioambiental y la optimización a través de algoritmos genéticos. En función de los resultados obtenidos podemos derivar las siguientes conclusiones:

- La herramienta desarrollada permite generar el diseño óptimo de una cubierta de protección de yacimientos arqueológicos, que se adapta de la mejor manera posible a las peculiaridades de cualquier yacimiento.
- La combinación de diseño paramétrico, diseño generativo y análisis medioambiental proporciona una mejor comprensión del contexto en el que se encuentra el yacimiento y demuestra una mayor eficiencia en protección de restos arqueológicos frente al diseño tradicional.
- El uso de algoritmos genéticos en diseño arquitectónico proporciona una herramienta potente para definir y solucionar problemas complejos especialmente cuando es necesario alcanzar objetivos contrapuestos.
- La optimización a través de algoritmos genéticos requiere una clara definición del problema de diseño y del objetivo a conseguir, sobre todo en el caso de la optimización multiobjetiva. Es importante tratar de aclarar y simplificar el objetivo deseado para reducir el tiempo de optimización.
- El diseño final depende del diseñador. Aunque el proceso sea automatizado la herramienta no produce un diseño único sino que propone varias soluciones al problema que deben ser analizadas e interpretadas según el criterio del diseñador.
- La conexión del modelo paramétrico con el entorno BIM (Building Information Modeling) proporciona un proceso de diseño flexible e interactivo, ya que permite actualizar los elementos en tiempo real conservando todas las propiedades asignadas anteriormente, lo que facilita el manejo del proyecto y reduce el tiempo dedicado a su presentación.

8.2 Propuestas de líneas del trabajo para el futuro

Consideramos que este trabajo dispone de varias líneas de investigación para el futuro que permitirán mejorar y complementar el método desarrollado con el fin de convertirlo en una herramienta práctica para el diseño arquitectónico.

Primeramente, la herramienta puede ser aplicada a más casos de estudio y no solo en el contexto de coberturas para los yacimientos arqueológicos sino en otros contextos donde el control medioambiental es un factor imprescindible. Además, la herramienta permite experimentar con el proceso de diseño determinando diferentes objetivos y comprobando la sensibilidad de los parámetros de introducción a diseño final.

El sistema de la cubierta desarrollada puede ser convertido en un sistema modular para ampliar o personalizar el contorno de cubrición.

El método elaborado puede ser complementado con técnicas de optimización estructural con el fin de minimizar el peso de la estructura y como resultado reducir el coste del proyecto. La incorporación de otras simulaciones de condiciones climáticas como, por ejemplo, el análisis de flujos del aire o incluso con la introducción del análisis de ciclo de vida también suponen potenciales vías de ampliación. La combinación de todas estas herramientas potenciales permitirá analizar el objeto de estudio con mayor precisión y aportará al diseño un toque más exclusivo.

REFERENCIAS

AGNEW N. Y COFFMAN R. (1991). “Development and evaluation of the Hexashelter” en N. Stanley Price (ed). *The conservation of the Orpheus mosaic at Paphos, Cyprus*. Los Angeles. The Getty Conservation Institute. 36-41

ARIÑO, X., & SAIZ-JIMENEZ, C. (1997). “Deterioration of the Elephant Tomb (Necropolis of Carmona, Seville, Spain)”. En: *International Biodeterioration & Biodegradation*, Vol. 40, Núm. 2-4: 233-239. [https://doi.org/10.1016/s0964-8305\(97\)00034-6](https://doi.org/10.1016/s0964-8305(97)00034-6)

ASLAN, Z. (2008). The design of protective structures for the conservation and presentation of archaeological sites. Tesis de doctorado, University College de Londres

ASLA. Z., COURT S., TEUTONICO J.M, THOMPSON J (eds). (2018). *Protective Shelters for Archaeological Sites*. Roma. British School at Rome.

ATABAY, Ş. (2009). “Cost optimization of three-dimensional beamless reinforced concrete shear-wall systems via genetic algorithm”. En: *Expert Systems with Applications*, Vol. 36, Núm. 2: 3555-3561. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.02.004>

BAROZZI, M., VISCUSO, S., ZANELLI, A. (2015). “Design novel covering system for archaeological areas”. En: *Proceedings of the 7th International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures, Structural membranes*: 105-114

BARRERA POBLETE C.I. (2010). “Algoritmos Genéticos como Estrategia de Diseño en Arquitectura”. Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Cataluña. <http://hdl.handle.net/10803/109156>

BENAVENTE, D., SANCHEZ-MORAL, S., FERNANDEZ-CORTES, A., CAÑAVERAS, J. C., ELEZ, J., & SAIZ-JIMENEZ, C. (2010). “Salt damage and microclimate in the Postumius Tomb, Roman

Necropolis of Carmona, Spain”. En: *Environmental Earth Sciences*, Vol. 63, Núm. 7-8: 1529-1543. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0815-9>

CABELLO BRIONES, C. (2016). “The Effects of Open Shelters on the Preservation of Limestone Remains at Archaeological Sites”. Tesis de doctorado, Universidad de Oxford.

CABELLO BRIONES, C. (2017). “How to evaluate shelters for archaeological sites: some recommendations based on the use of exposure trials”. En: *Ge-conservacion*, Vol. 11: 34-41. <https://doi.org/10.37558/gec.v11i0.442>

CAETANO, I., SANTOS, L., LEITÃO, A. (2020). “Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design”. En: *Frontiers of Architectural Research*, Vol. 9, Núm. 2: 287-300. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.12.008>

CALDAS, L. G. y NORFORD, L. K. (2002). “A design optimization tool based on a genetic algorithm”. En: *Automation in Construction*, Vol. 11, Núm. 2: 173-184. [https://doi.org/10.1016/s0926-5805\(00\)00096-0](https://doi.org/10.1016/s0926-5805(00)00096-0)

CARRERO A. (s.f.) «Cubierta de la Sala del Mosaico de los Amores de Cástulo. Linares», en *Canca Carrero Arquitectos* (<http://canca-carrero.blogspot.com/2014/04/cubierta-provisional-del-mosaico-de-los.html>)

DAVIS D. (2013) «A History of Parametric» (<https://www.danieldavis.com/a-history-of-parametric/>).

ESMAELIAN TOUSSI, H. (2020). “The application of evolutionary, generative, and hybrid approaches in architecture design optimization”. En: *Journal of Faculty of Architecture*, Vol. 2, Núm. 2: 1-20.

ERTOSUN A. I. (2012). “Evaluation of Protective Structures in Archaeological Sites for in situ conservation of architectural remains and artifacts”. Tesis de maestría, Universidad Técnica de Oriente Medio.

FERNANDEZ-CORTES, A., ELEZ, J., CUEZVA, S., CAÑAVERAS, J., BENAVENTE, D., ROGERIO, M., SAIZ-JIMENEZ, C., & SANCHEZ-MORAL, S. (2014). “The conservation of the Carmona Necropolis (Sevilla, Spain)”. En: *The Conservation of Subterranean Cultural Heritage*: 45-50 <https://doi.org/10.1201/b17570-7>

FRAZER J. (1995). *An Evolutionary Architecture*. London. E.G. Bond Ltd.

GONZÁLEZ JUSTE, I. (2022). “Intervenciones arquitectónicas en ámbitos arqueológicos”. En: revista PH: 36). <https://doi.org/10.33349/2022.106.5045>

GRADIŠAR, L., KLINC, R., TURK, Ž., DOLENC, M. (2022). “Generative Design Methodology and Framework Exploiting Designer-Algorithm Synergies”. En: *Buildings* Vol. 12, Núm. 12: 2194. <https://doi.org/10.3390/buildings12122194>

HAUPT R.L, HAUPT S.E. (2004). *Practical genetic Algorithms*. New Jersey. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.

HOLST, M.K., KIRKEGAARD, P.H., CHRISTOFFERSEN, L.D. (2013). “Parametric Optimization of Hospital Design.” En: *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, Vol. 7, Núm. 281-289.

HUANG, Y.-S., CHANG, W.-S., SHIH, S.-G. (2014). “Building Massing Optimization in the Conceptual Design Phase”. En: *Computer-Aided Design and Applications*, Vol. 12, Núm. 3: 344-354. <https://doi.org/10.1080/16864360.2014.981465>

IUORIO, O., HOMMA, E. E., TSAVDARIDIS, K. D. (2022). “The Application of Free-Form Grid Shells as Protective Shelters in Archeological Sites”. En: *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2016. IASS Annual Symposium 2016: Spatial Structures in the 21st Century, 26-30 Sep 2016, Tokyo, Japan. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)*. <https://doi.org/10.31224/2263>

KIENZLE, P. (1998). “Conservation and reconstruction at the Palace of Minos at Knossos”. Tesis de doctorado, Universidad de York.

KIRLI ÖZER, G. y ARIN ENSARİOĞLU, S. (2022). “Design Proposal for a Protective Shelter to be Used in the Archaeological Excavation and Exhibition Phases of Housing Settlement and Mosaics of Myrleia”. En: *Journal of Mosaic Research*, Núm. 15: 413-431). <https://doi.org/10.26658/jmr.1143745>

LAURENTI, M. C. (2002). “Research project on protective shelters for archaeological areas in Italy A status report”. En: *Conservation and Management of Archaeological Sites*, Vol. 5, Núm. 1-2: 109-115 <https://doi.org/10.1179/cma.2002.5.1-2.109>

MASERA, G., IMPERADORI, M., VANOSSI, A., SALVATOR-JOHN LIOTTA, ITO, Y. (2015). “Modular, Adaptable Shelters for Environmentally Sensitive Archaeological Sites”. En: *International Colloquium on Bio-based and Bio-inspired Environmentally Compatible Structures, Tokyo*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2018.8008>

MERELLO, P., GARCÍA-DIEGO, F.-J., & ZARZO, M. (2013). “Evaluation of corrective measures implemented for the preventive conservation of fresco paintings in Ariadne’s house (Pompeii, Italy)”. En: *Chemistry Central Journal*, Vol. 7, Núm. 1. <https://doi.org/10.1186/1752-153x-7-87>

MOLLAERT, M., LAET, L. D., VERDONCK, A., LOMBARDI, S., BECCARELLI, P., ZANELLI, A. (2011). “Textile shelters for archaeological or heritage areas: design references”. En: *WIT Transactions on The Built Environment. STREMAH 2011*. <https://doi.org/10.2495/str110321>

MONEDERO, J. (2000). Parametric design: a review and some experiences. En: *Automation in Construction*, Vol. 9, Núm. 4: 369-377. [https://doi.org/10.1016/s0926-5805\(99\)00020-5](https://doi.org/10.1016/s0926-5805(99)00020-5)

NARAHARA, T. Y TERZIDIS, K. (2006). “Multiple-constraint Genetic Algorithm in Housing Design”. En: *Synthetic Landscapes. Proceedings of the 25th Annual Conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture*: 418-425.

NEGUER, J. & ALEF, Y. (2008). “Rapid Assessment of Shelters over Mosaics: Initial Results from Israel” en B. KHADER, A.B. ABED, M. DEMAS, T. ROBY (eds). *Lessons Learned: Reflecting on the Theory and Practice of Mosaic Conservation: Proceedings of the 9th Iccm Conference, Hammamet, Tunisia, November 29-December 3, 2005*. Los Angeles. The Getty Conservation Institute, 193-203.

ORDÓÑEZ MARTÍN, M., GÓMEZ DE CÓZAR, J. C., BENÍTEZ BODES, R. M. (2022). “Coberturas de yacimientos a ras de suelo en el ámbito español. Clasificación tipológica y análisis de protección efectiva”. En: *Ge-conservacion*, Vol. 22, Núm. 1: 90-106. <https://doi.org/10.37558/gec.v22i1.1097>

PALUMBO, G. (2002). “Sheltering an archaeological structure in Petra A case-study of criteria, concepts, and implementation”. En: *Conservation and Management of Archaeological Sites*, Vol. 5, Núm 1-2: 35-44 <https://doi.org/10.1179/cma.2002.5.1-2.35>

PEDELÌ, C. y PULGA, S. (2014). *Conservation Practices on Archaeological Excavations: Principles and Methods*. Los Angeles. The Getty Conservation Institute.

PÉREZ ALMAGRO M.C. «Las estructuras de Emilio Pérez Piñero en la musealización de dos espacios singulares» en MIDAS (<https://journals.openedition.org/midas/101?lang=en#quotation>)
<https://doi.org/10.4000/midas.101>

PICON, A. (2011). “Architecture and the Virtual Towards a new Materiality?”. En: *Praxis: Journal of Writing + Building*: 109-11

QUISPE, L. y ULLOA, W. (2021). “Application of BIM Tools in Parametric and Generative Design for the Conception of Complex Structures”. En: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 1203, Núm. 2: 1-11. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1203/2/022070>

RIVERO WEBER, L. (2011) *Memoria y lineamientos del Taller sobre Implementación de Cubiertas Arquitectónicas en Contextos Arqueológicos*. México. Talleres de Impresos Litópolis.

RIZZI, G. (2008) «Sheltering the Mosaics of Piazza Armerina: issues of conservation and presentation» en artículo online (https://www.archaeological.org/pdfs/site_preservation_Oct_08.pdf)

RIZZI G. (2018). “Considerations on archaeological shelters: a practitioner’s viewpoint” en A. Zaki, S. Court, J.M. Teutonico, J.Thompson (eds). *Protective Shelters for Archaeological Sites*. Roma. British School at Rome.

RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ, J. L., CORTES PEREZ, J. P., GRADISAR, L., FIGUEIREDO, B. A. F. (2021). “Structural Grid Predesign using Generative Design for Residential Building with Steel Structure on BIM Models - Structural grid predesign using generative design.” En: *Proceedings of the 39th International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe)*, Vol. 2: 59-66. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2021.2.059>

RODRÍGUEZ TEMIÑO, I. (2014) *Investigar, conservar, difundir. El Proyecto Guirnaldas en el Conjunto Arqueológico de Carmona*. Sevilla. Universidad de Sevilla.

RODRÍGUEZ TERMIÑO, I., JIMÉNEZ HERNÁNDEZ, A., GONZÁLEZ ACUÑA, D., & RUIZ CECILIA, J. I. (2012). “Avance de las nuevas investigaciones en la Necrópolis Romana de Carmona”. En: *SPAL Revista de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Sevilla*, Vol. 21: 127-151 <https://doi.org/10.12795/spal.2012.i21.08>

RODRÍGUEZ TEMIÑO, I. Y RUIZ CECILIA, J. (2015). “El Conjunto Arqueológico de Carmona: de Juan Fernández López y George E. Bonsor a Facebook”. En: *Menga. Revista de Prehistoria de Andalucía*, Núm 3: 237-267

RODRÍGUEZ TEMIÑO, I. & RUIZ CECILIA, J. (2017). “De Necrópolis Romana de Carmona a Conjunto Arqueológico de Carmona From Necrópolis Romana de Carmona to Conjunto Arqueológico de Carmona”. En: *Boletín del Museo Arqueológico Nacional*, Núm.35: 467-471.

RUTTEN D. (2010). «Evolutionary Principles applied to Problem Solving» (<https://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/evolutionary-principles>).

SANCHEZ-MORAL, S., CAÑAVERAS, J. C., BENAVENTE, D., FERNANDEZ-CORTES, A., CUEZVA, S., ELEZ, J., JURADO, V., ROGERIO-CANDELERIA, M. A., & SAIZ-JIMENEZ, C. (2018). “A study on the state of conservation of the Roman Necropolis of Carmona (Sevilla, Spain)”. En: *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 34: 185-197 <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.02.019>

SBROGIO, L., BASSO, A., BORIN, P., VALLUZZI, M., & GIORDANO, A. (2021). “Design Criteria and Procedures for Archaeological Shelters: Towards Flexibility Thanks to Algorithmic Modelling”. En: *12th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions. 12th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions. CIMNE*. <https://doi.org/10.23967/sahc.2021.073>

STANLEY PRICE N. P (ed.) (1984). *Conservation on archaeological excavations, with particular reference to the Mediterranean area*. Roma. ICCROM

TERZIDIS, K. (2006) *Algorithmic Architecture*. Boston. Architectural Press.

TRINGHAM, S. Y STEWART, J. (2008). “Protective Shelters over Archaeological Sites: A Review of Assessment Initiatives” en B. KHADER, A.B. ABED, M. DEMAS, T. ROBY (eds). *Lessons Learned: Reflecting on the Theory and Practice of Mosaic Conservation: Proceedings of the 9th Iccm Conference, Hammamet, Tunisia, November 29-December 3, 2005*. Los Angeles. The Getty Conservation Institute, 204-214.

VIERLINGER, R. (2013). “Multi Objective Design Interface”. Tesis de maestría, Universidad Técnica de Viena. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3401.0324>

YAKA ÇETIN, F., İPEKOĞLU, B., LAROCHE, D. (2012). “Reconstruction of Archaeological Sites: Principles Practice and Evaluation”. En: *International Journal of Architectural Heritage*, Vol. 6, Núm. 5:579-603). <https://doi.org/10.1080/15583058.2011.594931>

ZANELLI, A. (2015). “Architectural fabric structures in the refurbishment of archaeological and cultural heritage areas”. En: *Fabric Structures in Architecture*: 481-527. <https://doi.org/10.1016/b978-1-78242-233-4.00015-2>

(Sin autor) Consejería de Turismo, Cultura y Deporte. «Instalación de cubierta en el yacimiento arqueológico de Fuente Nueva 3. Orce, Granada» en página electrónica de Consejería de Turismo, Cultura y Deporte (<https://www.juntadeandalucia.es/organismos/turismoculturaydeporte/areas/cultura/bienes-culturales/actuaciones-conservacion/intervenciones/detalle/167853.html>)

(Sin autor) «Espacios singulares» en la página electrónica de Conjunto Arqueológico de Carmona (<https://www.museosdeandalucia.es/web/conjuntoarqueologicodecarmona/-/tumba-del-efante?inheritRedirect=true&redirect=%2Fweb%2Fconjuntoarqueologicodecarmona%2Fespacios-singulares>)

(Sin autor) (2018) «Trabajos cubierta villa romana», en página electrónica de Ayuntamiento de Almedinilla (<https://almedinilla.es/trabajos-cubierta-villa-romana/>)