

Propuesta original de bajo impacto físico y medioambiental, de coberturas ligeras de doble capa para yacimientos arqueológicos, optimizadas mediante software paramétrico y análisis del ciclo de vida

M. Ordóñez-Martín, J.C. Gómez de Cózar, R. M^a. Benítez Bodes

Resumen: La cobertura de yacimientos arqueológicos a ras de suelo ha motivado, en el último siglo, el empleo de multitud de sistemas con mayor o menor efectividad en su potencial de protección. En este artículo se valora la efectividad de 21 coberturas existentes en la Península Ibérica, analizándolas a partir de parámetros de control como su peso propio, superficie de envolvente e impacto medioambiental. A partir de las conclusiones extraídas, y como propuesta original de este trabajo, se desarrolla un sistema configurable de cobertura, mediante estructura ligera, basado en mallas de doble curvatura de una capa, compatible con envolvente textil cerrada de doble capa. En cada caso concreto, la solución final que mejor se adapta al yacimiento se obtiene tras un proceso de optimización del diseño, basado en parámetros, que reducen la materialidad a emplear, el proceso constructivo y el impacto medioambiental en cada fase del Ciclo de Vida.

Palabras clave: cobertura de yacimientos, optimización, diseño paramétrico, estructuras ligeras, análisis del ciclo de vida

Original proposal with low physical and environmental impact, for lightweight double layer coverings for archaeological sites, optimized through parametric software and life cycle analysis

Abstract: The coverage of archaeological sites at ground level has motivated, in the last century, the use of a multitude of systems with greater or lesser effectiveness in their protection potential. In this paper, the effectiveness of 21 existing covers in the Iberian Peninsula is assessed, analyzing them based on control parameters such as their own weight, envelope surface and environmental impact. Based on the conclusions drawn, and as an original proposal of this work, a configurable coverage system is developed, by means of a light structure, based on single-layer double-curvature meshes, compatible with a double-layer closed textile envelope. In each specific case, the final solution that best suits the site is obtained after a process of optimization of the design, based on parameters, which reduces the material to be used, the construction process and the environmental impact in each phase of the Life Cycle.

Keywords: archaeological coverage, optimization, algorithmic design, light structures, life cycle assessment

Proposta original de baixo impacto físico e ambiental, de coberturas leves de dupla camada para sítios arqueológicos, otimizadas através de software paramétrico e análise de ciclo de vida

Resumo: A cobertura de sítios arqueológicos ao nível do solo motivou, no último século, a utilização de uma multiplicidade de sistemas com maior ou menor eficácia no seu potencial de proteção. Este artigo avalia a eficácia de 21 coberturas existentes na Península Ibérica, analisando-as com base em parâmetros de controlo como o seu peso, a superfície envolvente e o impacto ambiental. Com base nas conclusões retiradas, e como proposta original deste trabalho, é desenvolvido um sistema de cobertura configurável, utilizando uma estrutura leve, baseada em malhas de dupla curvatura de camada única, compatível com um envelope têxtil fechado de dupla camada. Em cada caso concreto, a solução final que melhor se adapta ao local é obtida após um processo de otimização do projeto, baseado em parâmetros que reduzem a materialidade a utilizar, o processo construtivo e o impacto ambiental em cada fase do Ciclo de Vida.

Palavras-chave: cobertura de sítios arqueológicos, otimização, desenho paramétrico, estruturas leves, análise do ciclo de vida

Antecedentes

La ejecución de coberturas es la única estrategia efectiva para la conservación de yacimientos arqueológicos in-situ a ras de suelo (Díaz 2005). En los últimos 35 años en la Península Ibérica, se han materializado soluciones que no han resultado, en la mayoría de los casos, completamente efectivas desde el punto de vista de huella física y de conservación preventiva ante los diversos agentes ambientales: temperatura, humedad, radiación solar o erosión del viento, etc. (Cabello 2018). Son evidentes los desajustes con el objeto a proteger por ineficiente protección física y ambiental, impacto paisajístico o impacto físico en sus apoyos o rigidez formal (Aslan 1997).

Con el fin de acercar los bienes excavados a las condiciones de conservación de una vitrina arqueológica (Rodríguez 2014), deben cumplirse las premisas de: ligereza, reversibilidad, escaso impacto físico, fácil mantenimiento y buen control climático del espacio cubierto.

En el proceso de diseño debe atenderse a diversos parámetros físicos y geométricos: irregularidad topográfica, geometría y altura de la cubierta, sistema de estructura y de envolvente, limitación del número de apoyos, etc., que están interrelacionados con la integración formal con el yacimiento, su comportamiento estructural, su efectividad higrotérmica y su impacto medioambiental.

El diseño paramétrico se convierte así en una herramienta útil en la generación de modelos de aplicación en este ámbito ya que, utilizando algoritmos generadores, pueden crearse espacios y estructuras complejas con mínimo empleo de recursos y posibles reconfiguraciones que se adapten a modificaciones surgidas en fase de proyecto o ejecución de obras (Holzer *et al.* 2007).

El diseño de coberturas arqueológicas debe basarse en estrategias de: ligereza, rapidez de montaje, flexibilidad (para adaptarse a geometrías irregulares, al proceso de excavación y posibilitar variedad de configuraciones de la envolvente) reversibilidad y reciclabilidad, lo cual implica una reducción directa del impacto medioambiental (Gómez *et al.* 2017; Gómez *et al.* 2019; Moncaster *et al.* 2018).

Dentro de las estructuras de coberturas ligeras en yacimientos, la parametrización es de especial importancia en aquellas tipologías donde forma y estabilidad están íntimamente relacionadas, como las estructuras tensadas de grandes luces, requiriendo procesos iterativos de cálculo a partir de condicionantes geométricos (Novyzedlák 2021).

Otros estudios, basados en la generación de superficies orgánicas mediante NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines), reflexionan sobre la posibilidad de generación de soluciones de mallas estructurales parametrizadas proponiendo una forma arquitectónica como hipótesis de partida para optimizar el coste material de la solución (Mateus *et al.* 2014).

El diseño paramétrico de mallas espaciales permite generar coberturas de espacios con mínimos apoyos, al modelizar conexiones y condiciones de contorno, además de su optimización material, con intercambio de información en tiempo real entre geometría proyectada y comportamiento estructural, obteniéndose soluciones optimizadas desde el punto de vista material de su ciclo de vida (Edmonds *et al.* 2022; Farez *et al.* 2019). Se aplica también de forma combinada con el cálculo mediante elementos finitos y algoritmos genéticos para la optimización de cubiertas de armaduras de madera (Bonelli y Begliardo 2016).

La teoría de algoritmos genéticos, que aplica la resolución de problemas de optimización basados en selección natural modificando repetidamente una población de soluciones hasta llegar a una solución optimizada, se está implementando en el ámbito patrimonial para conseguir modelos donde prime el concepto de sostenibilidad, identificando parámetros como: necesidades espaciales, peso de material, minimización de residuos, optimización de procesos constructivos, limitación de demanda energética, etc., obteniendo modelos con un alto grado de adaptación al medio (Camporeale 2012).

Propuestas recientes minimizan el consumo de recursos para la fabricación al seleccionar productos y fomentar su reutilización. Proponen ejemplos de cubiertas de entramados prefabricados de madera reconfigurables, cuyos elementos seriados se fabrican mediante fresado robotizado a partir de armaduras de madera desmontadas reprocesadas. (Hua *et al.* 2022).

La rapidez de montaje y la flexibilidad en el uso se relacionan en ocasiones con soluciones que plantean partes móviles en estructura y envolvente en las que se definen patrones de movimiento y vinculación de los nudos para su transporte y montaje. En estos casos resulta fundamental su integración en un proceso global de generación y optimización paramétrica combinada con algoritmos genéticos, de cara a una optimización global del proceso (generación, fabricación, montaje, desmontaje y reutilización) (Saito *et al.* 2009).

En investigaciones recientes aplicadas a modelos de cobertura para yacimientos arqueológicos desde criterios de conservación patrimonial se analizan algunos generados mediante modelado algorítmico, basados en planos inclinados, mallas planas tridimensionales o mallas de geometría curva de una capa, elaborando una metodología de optimización desde criterios de compatibilidad física y efectividad en la protección. Se avanza también en la posibilidad de incorporar a los modelos de análisis factores ambientales determinantes de los procesos de alteración como la incidencia de la luz natural, la ventilación o las variaciones de temperatura (Ordóñez y Gómez 2020).

En el presente artículo se analizan 21 coberturas de yacimientos a ras de suelo construidas en la Península Ibérica en los últimos 35 años, proponiéndose un sistema original de cobertura gestionado a partir de un proceso paramétrico de optimización que reduce su impacto medioambiental.

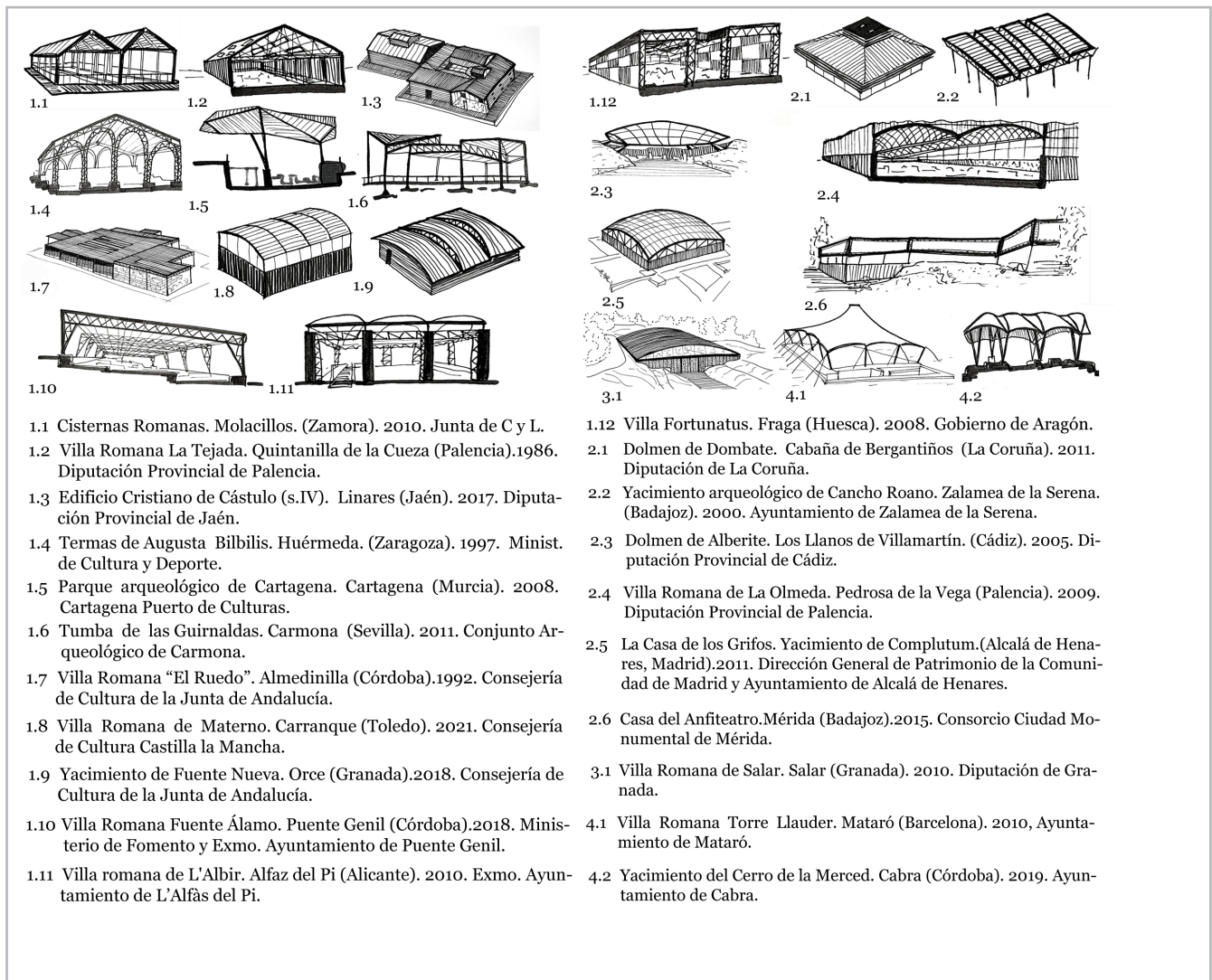


Figura 1.- Esquema conceptual de intervenciones analizadas. Fuente: elaboración propia.

Objetivos

Los objetivos de esta investigación son los siguientes:

- Clasificación y análisis de los sistemas estructurales y constructivos empleados en los modelos de cobertura de yacimientos arqueológicos ejecutados en los últimos 35 años en el ámbito de la Península Ibérica. Determinación de debilidades y fortalezas.
- Propuesta de un sistema original de cobertura para yacimientos arqueológicos a ras de suelo que, a partir de los resultados obtenidos en el punto anterior, optimice su rendimiento, minimizando su impacto medioambiental.

Metodología

Se propone la siguiente metodología original:

- Clasificación y análisis de 21 modelos de cobertura

existentes, atendiendo a: sistema estructural, tipo y configuración de envolvente, tipo de cimentación, peso propio de la estructura, superficies de envolventes, coste de ejecución y mantenimiento, flexibilidad/capacidad de adaptación al yacimiento, impacto visual y sostenibilidad de las intervenciones.

- Propuesta original de sistema de cobertura, atendiendo a: fundamentos y referencias previas, desarrollo geométrico y definición constructiva.

- Desarrollo instrumental del sistema propuesto a partir de software paramétrico que optimice el sistema atendiendo a criterios de selección de materialidad, minimización de peso propio y de superficie de envolventes y, por lo tanto, del impacto medioambiental.

- Comprobación de la efectividad del sistema propuesto a partir de la generación de un caso particular comparable con el estudio de casos existentes que se ha realizado.

Mod.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1.1	11-18-4,5	Pórticos planos de acero laminado. Uniones soldadas.	Sin cerramiento//Chapa de acero prelacado sobre tablero de madera.	Vigas de acero laminado, sobre muretes de hormigón armado.	24,57-19,26-SE	1,05-2,06	Sí	743,64	9,01	5
1.2	32-55,5-7	Cerchas trianguladas de acero laminado sobre pilares del mismo material. Uniones soldadas.	Fábrica pesada a base de bloques prefabricados de hormigón// Placas de fibrocemento.	Zanjas corridas o aisladas de hormigón armado.	14,40-15,15-260	1,76-1,76	No	S/D	13,30	4
1.3	12-16-5	Pórticos planos de vigas y pilares de acero laminado.	Parcial de celosía de lamas de acero//Panel sándwich de acero prelacado.	Vigas de acero laminado sobre muros emergentes del yacimiento.	20,74-11,24-7,50	1,37-2,31	No	609,37	61,96	1
1.4	12-25-10	Pórticos a modo de arcos de estructura triangulada en acero laminado, y correas de cubierta a base de cerchas del mismo material. Uniones soldadas.	Sin cerramiento//Paneles de policarbonato.	Apoyo sobre muros emergentes del yacimiento mediante placas de anclaje.	29/0,73/SE	1,03-2,98	No	S/D	19,27	5
1.5	27-78-12	Malla espacial de acero laminado en perfiles de alma llena, sobre soportes tubulares del mismo material. Uniones soldadas.	Sin cerramiento//Paneles de policarbonato.	Micropilotes.	26,37-0,75-SE	1,05-1,72	No	949,24	20,05	6
1.6	19-22,5-5,67	Pórticos planos de vigas de alma llena o cerchas de acero laminado, sobre pilares del mismo material. Uniones soldadas.	Sin cerramiento//Tablero de madera OBS con aislamiento térmico y lámina impermeabilizante autoprottegida.	Micropilotes	20,74- 21,78-SE	1,05-2,30	No	294,93	27,49	5
1.7	38-28-3a5	Pórticos planos de pilares de perfiles de alma llena de acero laminado, y vigas cercha del mismo material. Uniones soldadas.	Parcial mediante celosía de acero//Chapa grecada con paños puntuales de placas translúcidas de poliéster.	Zapatas de hormigón armado, o apoyo sobre muros emergentes del yacimiento mediante placa de anclaje.	16,19-10,90-7,50	1,06-1,52	NO	S/D	49,20	2
1.8	48,62-48,42-7	Pórticos de cerchas planas curvas de acero laminado, sobre pilares de perfil de alma llena del mismo material. Uniones soldadas.	Citara de ladrillo perforado a media altura//Paneles sandwich de acero prelacado con aislamiento térmico.	Zapatas de hormigón armado.	9,07-10,63-172,50	1,11-1,33	No	S/D	21,93	4
1.9	20,15-31,40-8,30	Pórticos de cerchas planas curvas de acero laminado, sobre pilares de perfil de lama llena del mismo material. Uniones soldadas.	Celosía de lamas de acero galvanizado//Chapa grecada de acero galvanizado prelacado.	Zapatas corridas de hormigón armado.	18,62-11,45-7,50	1,99-1,99	Sí	367,94	49,68	4
1.10	27-56-8	Pórticos de vigas y pilares de estructura plana triangulada de acero laminado. Uniones soldadas.	Sin cerramiento//Membrana tensada de textil estructural.	Encepados y micropilotes de hormigón armado, externos a excavación.	11,80-0,75-SE	1,00-1,77	Sí	478,84	18,74	5
1.11	16-32-7	Celosía espacial triangulada de acero laminado en vigas y pilares. Uniones soldadas.	Sin cerramiento//Membrana tensada de textil estructural.	Zapatas aisladas de hormigón armado.	43,40-0,78-SE	1,04-2,42	Sí	615,23	18,11	5
1.12	42-53-7	Celosía espacial triangulada de acero laminado en vigas y pilares. Uniones soldadas.	Paneles de poliéster translúcido//Chapa grecada de acero prelacado.	Zapatas aisladas de hormigón armado.	22,00-10,90-0,71	1,45-1,45	Sí	S/D	17,32	4
2.1	35-35-6	Bóveda a base de arcos de madera, apoyados sobre durmiente de madera y soportes tubulares de acero laminado. Uniones atornilladas o por esterotomía.	Vidrio termoacústico, con celosía superior de lamas metálicas// Cubierta ventilada de chapa de cobre sobre tablero de madera con aislamiento térmico.	Muros de contención de hormigón armado.	54,37- 18,80-25,00 a 49,00	1,26-1,26	No	779,43	36,18	4

2.2	48-45-9	Mallas espaciales trianguladas de geometría plana, en acero laminado con uniones atornilladas, sobre soportes de perfiles de acero laminado de alma llena.	Sin cerramiento//Chapa grecada de acero, y paneles traslúcidos de policarbonato.	Zapatas aisladas de hormigón armado.	21,60-9,50-SE	1,00-1,77	Sí	S/D	14,66	5
2.3	20-18-4,5	Malla curva de perfiles tubulares de acero laminado Uniones soldadas.	Sin cerramiento//Chapa lisa de acero.	Pedestales de hormigón armado.	27,65-7,85-SE	1,01-1,53	No	886,63	7,90	1
2.4	101,25-75-11,75	Bóvedas de retícula modular romboidal de acero laminado, prefabricada en taller y ensamblada mediante nudos atornillados, sobre pórticos de perfiles de alma llena de acero laminado con unión soldada.	Muro de hormigón armado, paneles de policarbonato y chapa de acero corten perforada//Chapa de aluminio con aislamiento térmico.	Muro perimetral y zapatas aisladas de hormigón armado.	33,00-20,55-entre 0,71 y 625, con paños de 15,70	1,54-1,54	Sí.	1.084,42	18,54	4
2.5	34-39,50-12	Bóveda de entramado de cerchas planas de acero laminado. Uniones soldadas.	Parcial de chapa grecada de acero//Paneles sándwich de chapa de acero prelacada.	Zapatas aisladas de hormigón armado.	19,50-1,13-9,50	1,32-1,50	Si	327,41	23,44	4
2.6	60-70-3,5	Malla espacial triangulada de perfiles de aluminio sobre soportes de acero laminado a base de perfiles de alma llena. Uniones atornilladas.	Sin cerramiento//Membrana tensada de textil estructural.	Dados o muros de hormigón armado.	12,26-1,00-SE	1,00-1,57	No	270,86	8,40	2
3.1	26-24-2,50	Cubierta autoportante de chapa perfilada de simple curvatura de acero galvanizado lacada. Uniones atornilladas.	Chapa perforada ondulada, y paños de vidrio//Chapa perfilada curva de acero.	Zunchos de hormigón armado.	18,43-18,43-16,50 a 20,00	1,38-1,38	Sí	177,54	34,60	4
4.1	21-24-8	Membrana textil atirantada sobre mástil y trípodes a base de perfiles tubulares de acero laminado.	Sin cerramiento//Membrana tensada de textil estructural.	Dado de hormigón, y puntos de anclaje mediante placas de acero y pernos clavados en terreno perimetral al yacimiento.	1,72-0,90-SE	1,20-1,73	Sí	495	14,92	3
4.2	17-22-6	Arcos a base de perfiles tubulares de acero laminado, con cubierta textil atirantada. Uniones soldadas.	Sin cerramiento//Membrana tensada de textil estructural.	Zapatas aisladas de hormigón armado.	12,26-0,86-SE	1,14-1,97	No	409,87	17,36	3

Siendo:

- A** Dimensiones Máx. Aprox. (Ancho-Largo-Alto), en m.
- B** Sistema estructural.
- C** Configuración envolvente (Cerramiento//cubierta).
- D** Tipología de cimentación.
- E** Pesos propios estimados (estructura-envolvente horizontal-envolvente vertical) (SE si no cuenta con envolvente), en Kg/m².
- F** Cociente entre valores de superficie de envolvente de cobertura y superficie cubierta en planta (Caso envolvente actual-Caso envolvente hipótesis edificio cerrado).
- G** Verificación de capacidad de adaptación y ampliación del modelo frente a evolución futura del yacimiento.
- H** Coste €/m² de contrata sin IVA (base datos licitación pública) considerando 13% CI y 6% BI, corregido con variación de inflación según INE a año 2023 (S/D si no se ha tenido acceso a datos).
- I** Coste €/m² de mantenimiento de contrata sin IVA para los elementos estructurales y de envolvente en los 10 primeros años (Base de datos "Módulo de Mantenimiento General Cype Ingenieros S.A.).
- J** Clasificación de impacto visual de la intervención (1. Cubiertas interpretativas que evocan la volumetría original. 2. Cubiertas ajustadas a la geometría en planta. 3. Elementos de protección ligeros de carácter temporal con mínima unión al yacimiento. 4. Cubierta sin relación formal a modo de cofre protector. 5. Cubierta sin relación formal como elemento de sombra o protección de pluviometría. 6. Cubierta de impronta arquitectónica de gran impacto visual).

Tabla 1.- Características de las coberturas analizadas.

Clasificación y análisis de sistemas de cobertura de yacimientos existentes en la Península Ibérica (1986-2021)

En nuestra trayectoria investigadora hemos desarrollado una metodología de trabajo que ha generado modelos de cobertura ligera y de rápido montaje, compuestas por mallas espaciales de geometría curva y envolvente textil de doble capa. Estas se basan en la adaptabilidad al espacio a cubrir con una mínima huella física y ecológica, con objeto de lograr un control efectivo de las condiciones ambientales del espacio cubierto (Ordóñez y Gómez 2020). En un trabajo previo a este artículo se ha analizado la eficacia de protección de las coberturas de yacimientos existentes en los últimos 35 años en la Península Ibérica (Ordóñez y Gómez 2022).

En la [Figura 1] se exponen, a nivel de esquema, las 21 intervenciones analizadas, incluyendo su denominación, ubicación, años de construcción y entidad promotora.

En la [Tabla 1] se aporta información de los modelos seleccionados en la [Figura 1], ordenados en base a tipologías estructurales y materialidad similares.

El análisis de estos datos proporciona la siguiente clasificación tipológica:

- Tipo 1: *Sistemas de pórticos*. Pequeñas estructuras a dos aguas de pórticos paralelos de perfiles de alma llena; sistemas de luces intermedias con apoyos externos a la excavación con pórticos de cerchas planas de geometría recta o curva, de perfiles de alma llena o combinación de ambos; estructuras de grandes luces a base de pórticos de vigas y pilares conformados por celosías planas o tridimensionales.

- Tipo 2: *Sistemas de entramado/mallas espaciales*. Entramados/mallas bidireccionales de acero o aluminio con uniones soldadas o atornilladas, o madera en unión atornillada o por estereotomía, compuestos por una o dos capas de: mallas planas a base de tetraedros, geometrías poliédricas irregulares, mallas de simple curvatura de una capa basadas en rombos, mallas de doble curvatura de una capa a partir de perfiles tubulares metálicos o perfiles de madera o dos capas de entramado de cerchas planas de geometría curva. Los apoyos pueden presentarse mediante soportes de acero de perfil simple, soportes múltiples a modo de trípode, pedestales de hormigón o pórticos planos de vigas y pilares de acero laminado.

- Tipo 3: *Sistemas autoportantes*. Cubiertas de chapa perfilada de acero de geometría de simple curvatura. Presentan apoyos lineales laterales resueltos sobre soportes aislados o sobre muros emergentes.

- Tipo 4: *Sistemas de membranas tensadas*. Cubiertas tensadas con mástil central y perímetro atirantado o enmarcadas en estructuras tubulares de arcos de acero laminado.

Los tipos indicados presentan relaciones diversas con la envolvente, predominando los sistemas de cubierta compatibles con estructuras ligeras mediante soluciones de chapa perfilada de acero combinada, con frecuencia, con paños de chapa translúcida para favorecer la iluminación natural, aunque sin control de radiación directa en la mayoría de los casos. Se han encontrado coberturas completas de paneles traslúcidos de policarbonato celular. En otros casos se emplea chapa de acero como revestimiento de elementos base de tableros de madera, con o sin aislamiento térmico. Es habitual el uso de paneles sándwich de chapa de acero en estructuras porticadas de grandes luces. También se emplean cubiertas textiles como cobertura, atirantadas o no a estructuras de acero.

En la mayoría de los casos no existe envolvente vertical, generando un déficit de protección efectiva de la radiación solar, la erosión por acción del viento o la imposibilidad de realizar un control de las variables de temperatura y humedad.

Cuando sí existe, suele diseñarse con materiales ligeros. Su disposición busca el control parcial de la incidencia solar o el control de la iluminación natural, llegando incluso a modelos completamente cerrados combinando diversas soluciones de envolvente.

Respecto a la cimentación se observa que, en general, se emplean sistemas superficiales. En algunos casos se utilizan micropilotes para minimizar la superficie de apoyo. Suelen ser cimentaciones ejecutadas en el perímetro del yacimiento, especialmente en estructuras de grandes luces, combinadas con cimentaciones interiores a la excavación en algunas soluciones de entramado y porticadas, apoyándose en algunos casos de estructuras de pequeña escala sobre los elementos emergentes mediante durmientes. Normalmente, la incidencia de la cimentación vendrá determinada por las acciones de viento en sistemas ligeros con abundancia de soportes y por el peso propio en sistemas más pesados con reducción de soportes.

En el análisis de la relación entre la superficie de envolvente y la superficie cubierta en planta, se han evaluado dos familias de valores: la relación de superficies con la envolvente real (existen propuestas únicamente con envolvente de cubierta, con cerramiento parcial y cerradas en su totalidad) y los valores correspondientes a la hipótesis de edificio completamente cerrado. En la [Figura 2], se detalla el % de superficie de cobertura actual frente a la hipótesis de cerramiento completo del recinto.

En la [Figura3] se analiza la relación entre la superficie de envolvente y la superficie en planta. Se extraen valores máximos para el caso de envolvente real de 1,99 para sistemas Tipo 1, 1,54 para Tipo 2, 1,38 en Tipo 3, y 1,20 para Tipo 4, con un valor medio de 1,23. Según la [Tabla 1], sólo 10 modelos de los 22 estudiados cuentan con cerramiento, siendo además en 3 de los casos de tipo parcial.

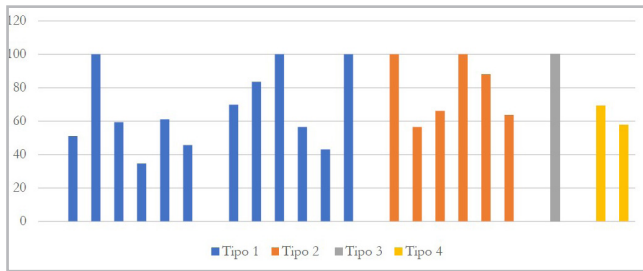


Figura 2.- Porcentaje de envoltente actual respecto a edificio teórico cerrado. Casos de estudio. Fuente: elaboración propia.

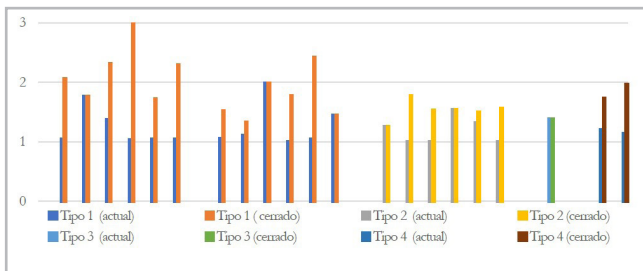


Figura 3.- Relación de superficies de envoltente y superficie de planta. Casos de estudio. (Comparativa envoltente actual/envoltente teórica edificio cerrado). Fuente: elaboración propia.

Para la hipótesis de cerramiento completo, los valores máximos pasan a ser de 2,98 para Tipo 1, 1,77 para Tipo 2, 1,38 en Tipo 3, y 1,97 para Tipo 4, con un valor medio de 1,72, suponiendo un aumento del 60 % respecto a los valores actuales, requiriendo en algunos casos una superficie de envoltente de hasta 3 veces la superficie en planta, lo cual supone una proporción de envoltente muy elevada respecto al espacio de cobertura necesario, en muchos casos debido al empleo de grandes alturas libres que suponen mayor exposición a agentes externos para los objetos excavados.

Cuando se analiza el peso propio por unidad de superficie cubierta, considerando primero el sistema estructural y, en segundo lugar, el conjunto que conforma con la envoltente

[Figura 4], se obtienen para el Tipo 1 un valor máximo de 43,40 kg/m², con valor medio de 21,40 kg/m², máximo de 54,37 kg/m² para sistemas Tipo 2, con valor medio de 28,06 kg/m², 18,43 kg/m² para sistemas Tipo 3, y valores entre 1,72 y 12,26 kg/m² para el Tipo 4. Si se considera el peso del material de cobertura, los valores anteriores pasan a un valor máximo de 44,18 kg/m² para Tipo 1, con valor medio de 30,93 kg/m², máximo de 73,17 kg/m² para Tipo 2, con valor medio de 39,36 kg/m², los sistemas Tipo 3 no presentan variación, y valores entre 2,62 y 13,12 kg/m² para el caso de sistemas Tipo 4.

Al considerar el peso propio de cubierta, se aprecia un aumento del valor global en torno al 44,00% en sistemas Tipo 1, y del 40,00% para sistemas Tipo 2, poniendo de manifiesto la importancia de una correcta elección de envoltente acorde a la ligereza del sistema de estructura.

Al analizar los costes de ejecución y de mantenimiento, se obtienen los valores medios de repercusión en base a precio de contrata de ejecución (conforme a lo indicado en el pie de la tabla) [Figura 6], de 579,88 €/m² para el caso de Tipo 1, con valor máximo de 949,24 €/m², de 669,75 €/m² con valor máximo de 1084,42 €/m² para Tipo 2, de 177,54 €/m² para

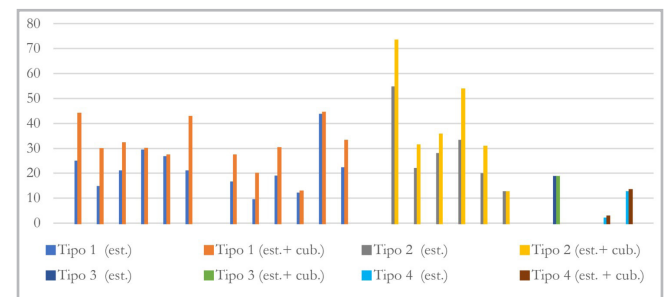


Figura 4.- Valores de peso propio (kg/m²) de estructura y estructura + cubierta. Casos de estudio. Fuente: elaboración propia.

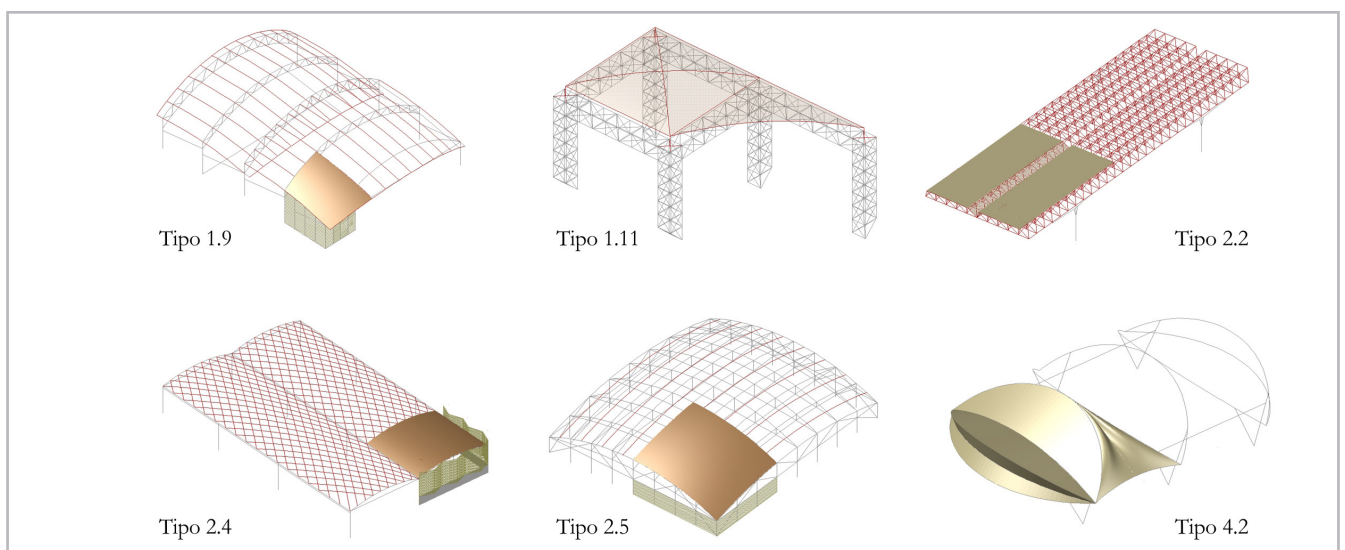


Figura 5.- Esquema estructural y de envoltente. Casos de estudio ACV. Fuente: elaboración propia.

Tipo 3, y de 452,43 €/m² para Tipo 4, con valor máximo de 495 €/m², revelándose los sistemas de tipo autoportante y de membrana tensada como los de coste más reducido.

Al analizar la repercusión de coste de mantenimiento global de sistemas estructurales y de envolvente en sus 10 primeros años [Figura 7], se obtiene un valor medio de 27,17 €/m² para intervenciones Tipo 1, con un valor máximo de 61,96 €/m², de 18,18 €/m² para Tipo 2, con un valor máximo de 36,18 €/m², de 34,60 €/m² para Tipo 3, y de 16,14 €/m² para Tipo 4, con máximo de 17,36 €/m² revelándose como sistemas de menor coste en labores de mantenimiento, los tipos de entramado metálico ligero y de textil tensado.

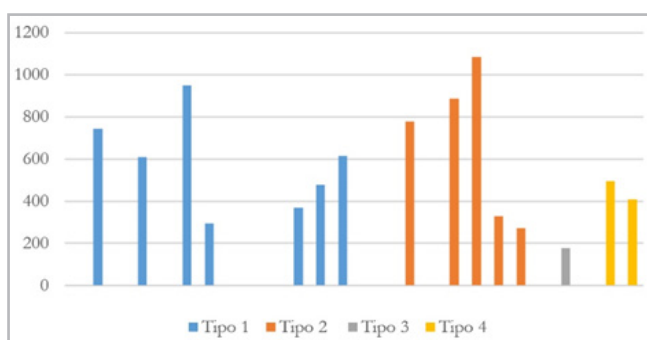


Figura 6.- Coste de contrata € /m² corregido con variación de inflación a diciembre de 2023

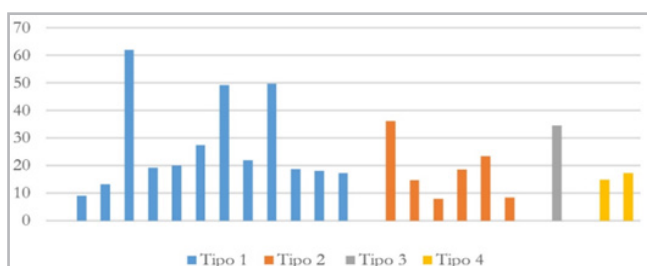


Figura 7.- Coste de mantenimiento en 10 primeros años €/m² (estructura+envolvente)

Analizando la capacidad de adaptación de los sistemas previstos, a los procesos de evolución propia de los yacimientos fruto de la actividad arqueológica, encontramos que, sólo en el 47% de los casos, los sistemas de cobertura previstos presentan alta capacidad de ampliación gracias a su flexibilidad o modularidad.

Por otra parte, con el fin de evaluar el impacto visual y de integración en el yacimiento y el entorno de los sistemas analizados, se ha establecido, en base a criterios de adaptabilidad al contexto (Medlin 1979), ajuste a geometría del yacimiento (Schmidt 1988), relación formal (Giachentti 1994) o estrategia de intervención (Juste 2022), la siguiente clasificación:

1. Cubiertas interpretativas que evocan la volumetría.
2. Cubierta ajustada a la geometría.
3. Elemento de protección ligero de carácter temporal

de mínima unión al yacimiento.

4. Cubiertas sin relación formal a modo de cofre protector.
5. Cubiertas sin relación formal como elemento de sombra.
6. Cubiertas de impronta arquitectónica de gran impacto visual.

Encontrando que el 38% podrían encuadrarse en el grupo 4, y el 28% en el grupo 5 suponiendo otro 38% las actuaciones de mayor integración y ajuste a la geometría del yacimiento, representando únicamente un 4,70 % las intervenciones de impronta arquitectónica ajenas a la integración formal o interpretativa con el yacimiento.

Siguiendo la metodología, se evalúa el impacto medioambiental, mediante la metodología de Análisis del Ciclo de Vida (ACV). Se han seleccionado 6 modelos, pertenecientes a las tipologías estructurales clasificadas, para mostrar la mayor diversidad posible de casos diferentes que cumplen la misma función [Figura 5].

Para el análisis de ACV se han seguido las normas UNE-EN ISO 14040-2006, UNE-EN ISO 14044-2006 y UNE-EN 15978-2012. El método plantea 4 fases principales: definición de objetivos, inventario de ciclo de vida, evaluación e interpretación de impactos durante el ciclo de vida.

La categoría de impacto y los indicadores utilizados se basan en publicaciones previas (Asdrúbali *et al.* 2017; Galán *et al.* 2015) en donde se señala la categoría de impacto "riesgo de calentamiento global" (GWP) como la más relevante para el estudio realizado.

Conforme a UNE-EN 15978-2012 se han considerado las siguientes fases del ciclo de vida:

- Fase de Producción, incluyendo materias primas (A1-2) y fabricación (A3).
- Fase de Construcción, se incluye transporte al yacimiento (A4) y proceso constructivo/ montaje (A5).
- Fase de Final de Vida. Se consideran la deconstrucción del modelo (C1), el transporte a vertedero o a planta de reciclaje (C2), proceso de desperdicios para reúso, recuperación o reciclado (C3) y disposición final (C4).

La fase de uso B1-7 no se ha incluido ya que se analizan estrategias de diseño (forma y materialidad) relacionadas con la reducción de la energía incorporada al proceso.

Como unidad funcional se ha establecido el sistema constructivo (cimentación+estructura+envolvente) por metro cuadrado. Se ha considerado en cada caso cimentación de HA suficiente para que actúe de lastre frente a acciones de viento.

Se han considerado escenarios de transportes idénticos para todos los casos (A4: 10,0 km para elementos de la

cimentación y 15,0 km para estructura y envolvente; C2: 15,0 km en todos los casos). Para la cuantificación de la energía consumida durante las fases de construcción y deconstrucción, se han seguido las recomendaciones de Kellenberger (Kellenberger 2004). Se establece un escenario de final de vida de reciclado para el acero y de depósito en vertedero para el hormigón de cimentación una vez sometido a un proceso de clasificación.

La evaluación de impactos se ha realizado a partir de la cuantificación de materiales incluidas en la [tabla 1], los transportes, los procesos de montaje y desmontaje y los escenarios de disposición final que se han indicado. Los valores de impactos unitarios en GWP se han obtenido de la base de datos Ecoinvent 2.0 (Frischknecht *et al.* 2007).

En la [Figura 8] se muestran los resultados. En general, excluyendo el caso de membrana (Tipo 4.2), se obtienen valores de impacto total comprendidos entre 61,16 y 87,13 kgCO₂Eq/m². Destaca el caso del sistema de entramado de malla plana (Tipo 2.2) donde se registra el menor valor, debido a la mayor optimización de perfiles y carecer de envolvente vertical. Se situará igualmente fuera de este rango el caso de membrana tensada, con 30,61 kgCO₂Eq/m², gracias a la ligereza de su materialidad, pese a la influencia que en ocasiones tiene el volumen de hormigón empleado en las cimentaciones de estas estructuras debido a la acción de succión de viento.

Al tratarse todos los casos de sistemas ligeros, la fase de Producción (A1-3) es la que más contribuye al valor global del impacto (sobre un 87,50%) distribuyéndose en función del tipo de cimentación (8,00-10,00% del total de esta

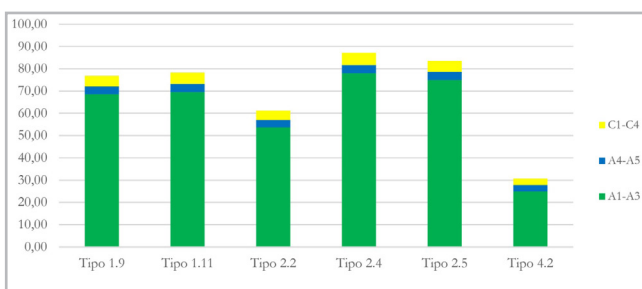


Figura 8.- Valores de impacto GWP (KgCO₂Eq/m²). Fuente: elaboración propia

fase, alcanzándose el 22,0% en membranas), del peso de la estructura y de la superficie de envolvente. La fase de construcción (A4-5) queda minimizada al tratarse de obras de montaje (5,50 %). La fase de Final de Vida (C1-C4) también contribuye relativamente poco al impacto global (7,00 %) gracias a los procesos de reciclaje de los elementos de acero que se han planteado.

El análisis realizado pone de manifiesto el margen de mejora que presentan los modelos estudiados en función de los diferentes parámetros que se han tenido en cuenta.

Propuesta original de cobertura.

A partir de los resultados obtenidos en el apartado anterior, se propone un sistema original específico para cobertura de yacimientos a ras de suelo basado en las siguientes premisas:

- Solución optimizada en función de criterios de adecuación al yacimiento/entorno, posibilidades de uso y reducción del impacto medioambiental.
- Forma ajustable tanto a cubiertas como a cápsulas habitables, en función del peralte en la clave, minimizando el volumen a acondicionar según el tipo de uso del recinto una vez cubierto.
- Estructura mínima para dos capas de cobertura, con capa rígida exterior resuelta con malla de arcos de directriz parabólica con cobertura textil y capa flexible interior resuelta con membrana textil tensada desde la capa exterior.
- Desmaterialización de la envolvente manteniendo el control higrotérmico del espacio gracias a la ventilación, natural o forzada, del aire contenido entre las dos capas de cobertura.

La geometría elegida, óptima tanto desde el punto de vista mecánico como de minimización del volumen acondicionado, procede de una larga tradición de construcciones abovedadas [Figura 9] con directrices tipo catenaria y parabólica (Rudofsky 1964). Estas mismas geometrías discretizadas en mallas fueron propuestas por Frei Otto (Roland 1973) para cualquier tipo de planta de extrema ligereza. Son especialmente interesantes las propuestas del mismo autor para cubiertas neumáticas de grandes luces que reducen, aún más, la materialidad a emplear, siendo José Miguel Prada

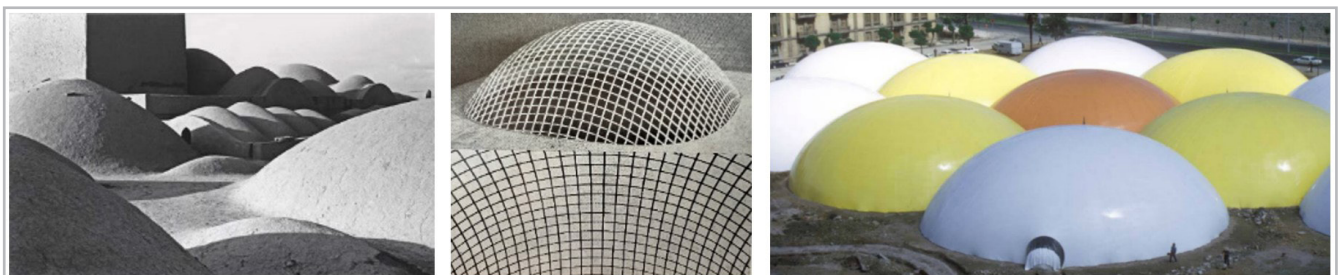


Figura 9.- Referencias previas de uso de bóvedas cupuliformes en todo tipo de planta. Fuentes: de izquierda a derecha: (Rudofsky 1964), Frei Otto (Roland 1973) y JM Prada Poole (Prieto y Quintáns 2021).

Poole quien avanzó en las posibilidades de generación de este tipo de geometrías y sus posibles combinaciones en proyectos complejos (Prieto y Quintáns 2021). El sistema propuesto continúa la evolución citada utilizando dos capas de membranas con una malla de una capa de estructura rígida. Este permite construir elementos optimizados desde el punto de vista formal material y sostenible, ya que al ser un sistema que no diferencia entre soportes y cubierta, por tratarse de una superficie continua, permite adaptar su geometría a las condiciones específicas de cada yacimiento (planta variable, variaciones de altura...), proponiéndose así una funcionalidad muy flexible.

Las geometrías que se generan proceden de la suma de dos superficies: cuártica (paraboloide hiperbólico de segundo grado) y cuádrlica (paraboloide elíptico), siendo a y b los semilados para planta rectangular y h el peralte en la clave, definida en fórmula [1].

$$[1] \quad z = \left(\frac{h}{a^2 b^2} x^2 y^2 \right) - \left(\frac{h}{a^2} x^2 + \frac{h}{b^2} y^2 - h \right)$$

Según la expresión anterior puede determinarse la geometría adaptada a un perímetro cualquiera (irregular) de cuatro lados en función de la teoría de la transformación de formas afines (Thompson 1961).

Desde el punto de vista constructivo, la cubierta se discretiza en dos familias de arcos parabólicos que conforman una malla de estructura de una sola capa. En función del perímetro, del número de partes (frecuencia) en las que se dividen sus lados y del peralte en la clave, las posibilidades tanto individuales como de combinación de elementos son infinitas [Figura 10]. Se ha previsto que la malla se construya con perfiles tubulares de acero laminado o con secciones de madera microlaminada. En el presente artículo se desarrollan formas construidas con mallas de perfiles tubulares de acero (S275/S355) porque son comparables con el estudio de casos realizado.

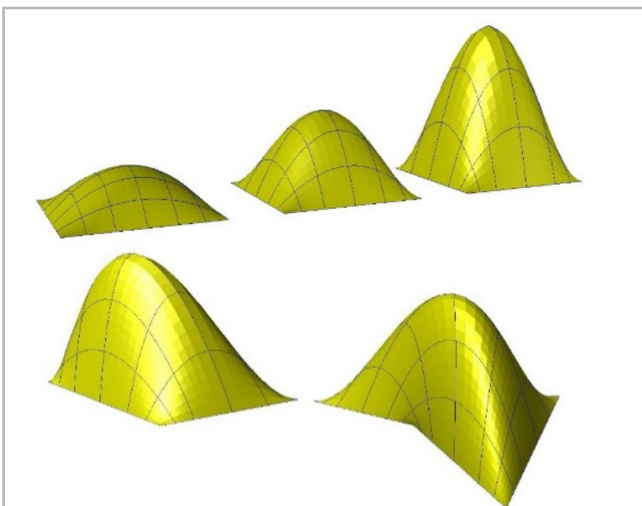


Figura 9.- Diferentes posibilidades geométricas resueltas con el sistema propuesto. Fuente: elaboración propia

Conforme a la [Figura 11], la membrana exterior de cobertura se adapta a la malla 1) y la interior 4) se tensa desde la malla mediante cintas de tensión de poliéster de alta tenacidad con mecanismos regulables basados en hebillas/tensores de acero inoxidable 3). La membrana exterior unida a la malla de la estructura 1) puede ser opaca/traslúcida (verano) o transparente (invierno). La membrana interior 4) siempre es opaca/traslúcida. Entre las dos capas de membrana se genera una cámara de aire 2) de espesores (arranques y clave) controlados desde el diseño para favorecer la circulación de aire. Los apoyos 5) se resuelven mediante anclajes al terreno o contrapeso de lastres o cimentación de HA, según el caso. A efectos de montaje, la malla se trasladará en el mínimo número de partes posibles. Todas las uniones a realizar en obra se plantean con chapas frontales y tornillería de acero 8.8.

En función de lo indicado, el sistema puede clasificarse dentro de los tipos 1, 2 y 3 de la clasificación de impacto visual propuesta en este artículo.

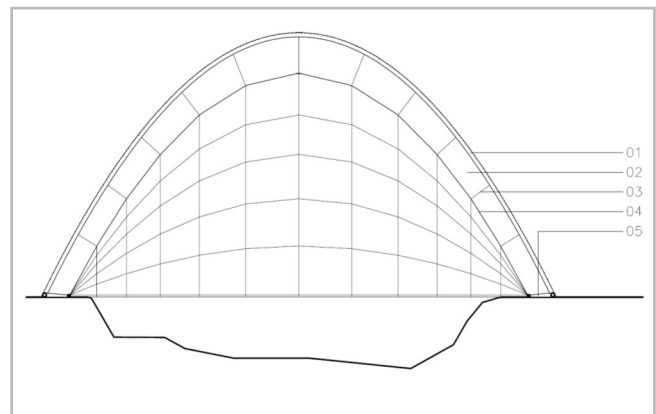


Figura 11.- Sección vertical de un caso concreto de cobertura. Fuente: elaboración propia.

Desarrollo paramétrico del sistema propuesto

El sistema que se propone parte de un modelo que vincula las fases del Ciclo de Vida, conforme a UNE-EN 15978-2012, con las estrategias de diseño necesarias para reducir el impacto en cada fase [Tabla 2]. Se han incluido también las relacionadas con las fases B1-7 para que el modelo sea completo, aunque no sea objeto de estudio en el presente artículo (Gómez 2017).

A partir de las estrategias descritas, la entrada de datos adecuada, basada en la materialidad, geometría, frecuencia y diseño de uniones, permite obtener los parámetros finales de optimización: número de nudos, peso propio, superficie de envolventes e impacto medioambiental (GWP).

En la [Figura 12] se incluye una pantalla del software propio desarrollado con todas las funciones disponibles. A partir de los datos indicados (generando automáticamente geometrías, calculando la estructura y el impacto medioambiental para GWP) se encuentra la mejor solución atendiendo a los parámetros de optimización descritos. Una vez fijada la solución, se generan tanto el despiece de la malla de estructura

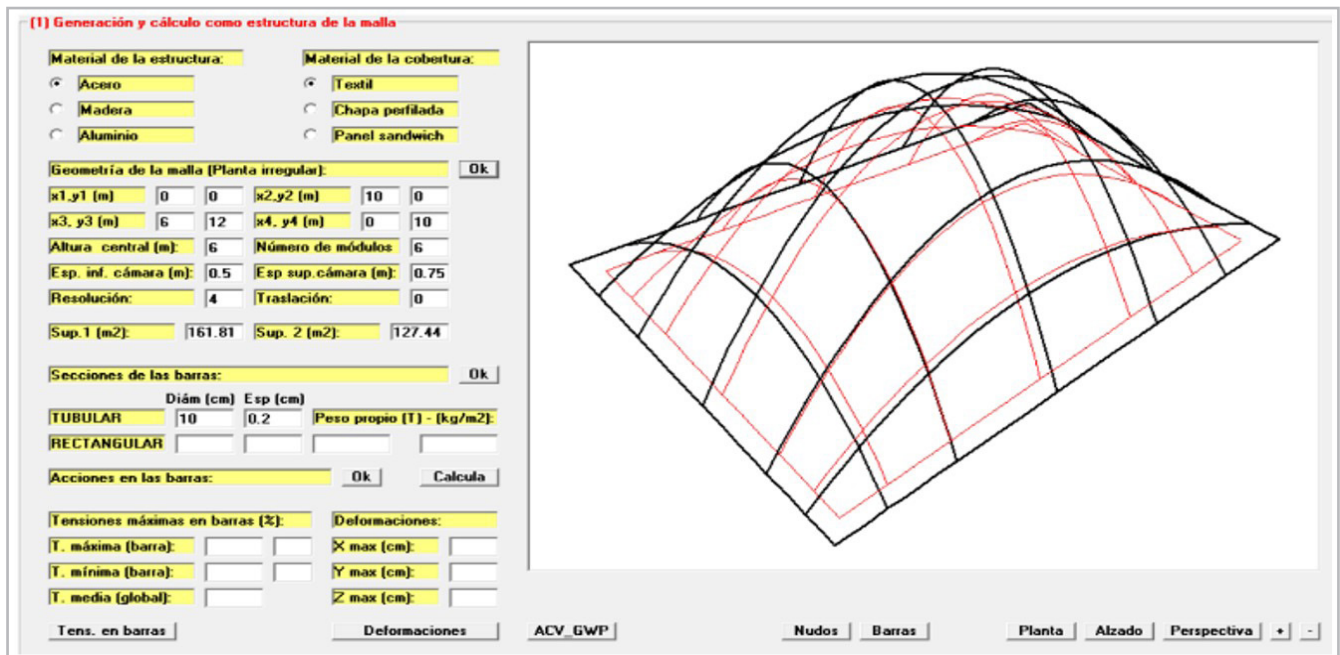


Figura 12.- Pantalla de software paramétrico de generación. Fuente: elaboración propia.

Fases de ACV	Parámetros
A1-3_Producción	Ligereza
A4-5_Construcción	Rápido montaje
B1-7_Uso	Flexible. Estrategias pasivas. Energías renovables.
C1-4_Final de vida	Reversible. Reciclable.

Tabla 2.- Estrategias de diseño del modelo propuesto.

como los patrones de las membranas textiles. El modelo se puede exportar a cualquier software de CAD/BIM.

Efectividad del sistema

Con objeto de mostrar el potencial del sistema desarrollado y poder comparar los resultados obtenidos con el análisis de casos de estudio realizado, se han analizado una serie de ejemplos de planta cuadrada con luces comprendidas entre 10,00 y 40,00 metros y peraltes máximos en el centro entre L/8 y L/2 metros, resueltos con tubos de acero laminado (S275) y membranas textiles traslúcidas de poliéster con revestimientos de PVC. En cada caso, se han ajustado las frecuencias al tamaño en planta de la malla, teniendo en cuenta que deben permitir el paso de personas y enseres, a dimensiones entre tubos comprendidas entre 2,00 – 3,00 metros. Se ha considerado el caso más desfavorable al considerar una cimentación perimetral de vigas corridas de HA-25 y B500S.

Para el cálculo de la estructura se han tenido en cuenta las acciones habituales (concargas+sobrecargas) en este tipo de estructuras y acciones de viento en presión y en succión, conforme a CTE-DB-SE. Para el cálculo de ACV se han seguido las mismas premisas que se han utilizado en el análisis del estudio de casos.

Los resultados obtenidos indican lo siguiente:

- Se ha obtenido la superficie máxima de la cobertura exterior para peraltes comprendidos entre 0,00 y L metros, estableciéndose la relación entre superficies de envolvente y en planta. En la [Figura 13] se comparan los resultados obtenidos con modelos adintelados cúbicos con 5 caras cubiertas y con casquetes esféricos. En todos los casos el sistema propuesto es el que mejores relaciones presenta minimizando tanto la superficie de envolvente necesaria como el volumen a acondicionar. Por ejemplo, para un peralte de 0,5 L el modelo presenta un coeficiente de 1,53 frente a 2,00 (esfera) y 3,00 (caja adintelada).

- Cuando se comparan los valores obtenidos con el estudio de casos realizado, en su hipótesis de edificio cerrado [Figura 3], se observa que el caso que más se aproxima es el Tipo 3 (con peralte de L/10), con un valor de 1,38, siendo superiores los valores máximos para el resto de las tipologías, con incrementos superiores al 90 % en algún caso (2,98 en sistemas porticados, 1,77 en entramados, y 1,97 en membranas tensadas).

- En la [Figura 14], para todos los casos analizados, se muestran los resultados obtenidos para las luces estudiadas con cuatro situaciones de peralte (L/8, L/4, 3L/8 y L/2). Para luces inferiores a 15,0 m los peraltes L/8 producen mallas de peso similares a las de L/4 como consecuencia de que para L/8 la malla no está optimizada por el bajo estado tensional correspondiente a los mínimos tubos existentes en el mercado. Los modelos de menor peso son los que corresponden a peralte de L/4 (muy próximo a L/8). Siempre que las condiciones del espacio a cubrir lo permitan, este es el rango óptimo de peralte a emplear.

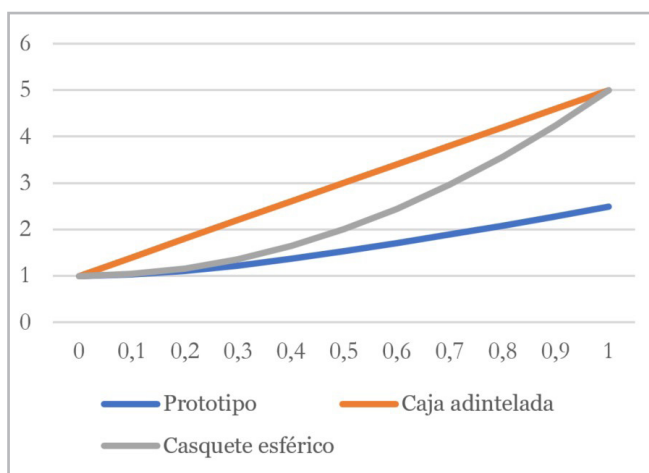


Figura 13.- Relación entre sup. de envoltente y sup. cubierta en planta para peraltes de 0,0L a 1,0L. Fuente: elaboración propia.

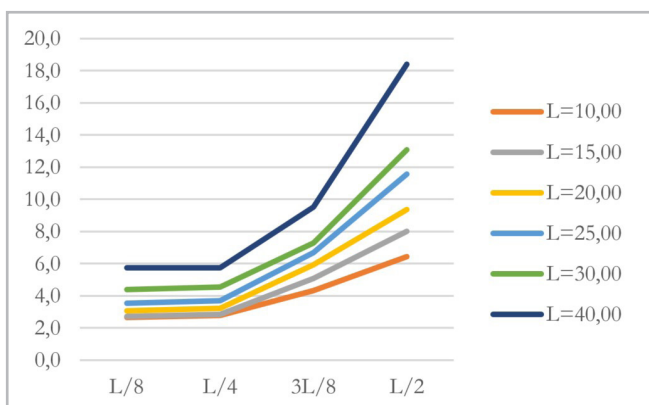


Figura 14.- Peso propio de la malla (kg/m²) en función de la luz y del peralte máximo central. Fuente: elaboración propia.

- Se comprueba que el sistema es extremadamente ligero, presentado valores de peso propio comprendidos entre 3,00 y 18,30 kg/m² para las luces analizadas.

- Cuando se comparan los valores obtenidos con los 21 casos de estudio, considerando solamente estructura y cubierta [Figura 4], se observa que únicamente se encuentran en el mismo rango las cubiertas con membrana tensada (2,62-13,12 kg/m²), resultando los valores para el resto de tipos claramente superiores, incluso en el caso de sistemas autoportantes de reducida materialidad (18,43 kg/m²), con valores medios elevados para el resto de tipologías (30,93 kg/m² sistemas porticados y 39,36 kg/m² en entramados).

- En la [Figura 15] se resumen los resultados obtenidos en el ACV de las diferentes soluciones analizadas para un peralte de L/4. Estos alcanzan un valor medio próximo a 20,0 kgCO₂Eq/m². Teniendo en cuenta la rapidez del montaje/desmontaje del sistema y el potencial de reciclado de los productos empleados, el impacto producido en las fases A4-5 (construcción) y C1-4 (final de vida) queda minimizado frente al producido por las fases A1-3 (producción). Al comparar los valores con los 21 modelos estudiados [figura 6], se aprecia que únicamente

se acercan al valor del prototipo los modelos de membrana (30,61 kgCO₂Eq/m²), quedando el resto en un rango entre 61,16 y 87,13 kgCO₂Eq/m², dejando patente el alto grado de sostenibilidad del sistema propuesto.

- Si se comparan los costes de ejecución y mantenimiento de los modelos propuestos con el estudio de casos [Figuras 16 y 17], se observa que el valor medio de coste de ejecución del sistema propuesto resulta un 47,19% inferior al valor medio de los modelos de estudio, siendo además su valor medio de coste de ejecución en los 10 primeros años un 38,38% inferior al valor medio de dicho parámetro en casos de estudio, y próximo al valor obtenido para el caso de Tipo 4.

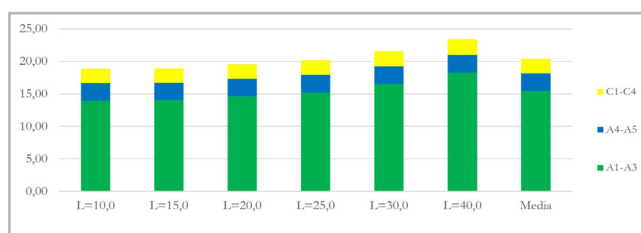


Figura 15.- Resultados de ACV (GWP, KgCO₂Eq/m²). Fuente: elaboración propia

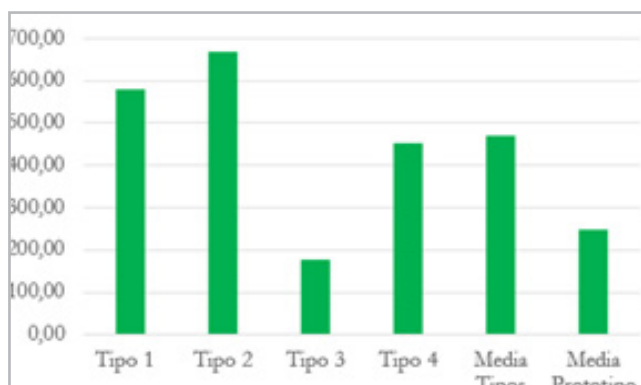


Figura 16.- Comparativa coste ejecución de contrata tipos y prototipo (€/m²).

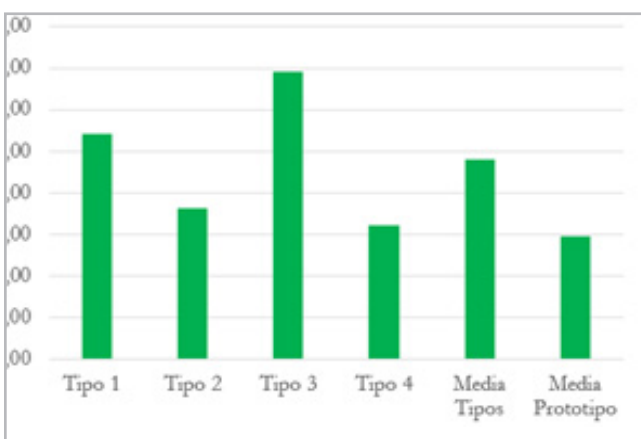


Figura 17.- Comparativa coste mantenimiento 10 primeros años tipos y prototipo (€/m²).

Conclusiones

Se constata que no existen demasiados estudios centrados en el ámbito patrimonial que utilicen herramientas paramétricas en tiempo de diseño que tengan en cuenta el impacto medioambiental para optimizar un conjunto de soluciones posibles.

Se pone de manifiesto que la mayoría de coberturas analizadas no se adaptan correctamente a las exigencias de un yacimiento, son excesivamente pesadas y producen un impacto medioambiental (GWP) que podría reducirse bastante.

Se ha propuesto un modelo que relaciona sus estrategias de diseño (ligereza, rapidez de montaje, flexible, reversible y reciclable) con las diferentes fases de ACV a efectos de minimizarlas. A partir de sus múltiples posibilidades, se ha desarrollado un sistema constructivo basado en mallas de arcos parabólicos de una capa con doble cobertura de membranas tensadas, cuyo diseño se optimiza a partir de un proceso paramétrico. Los resultados obtenidos, resumidos a continuación, avalan tanto la viabilidad del modelo como el desarrollo instrumental que se ha hecho de éste.

El sistema propuesto, frente a los 21 casos analizados, reduce la cantidad de estructura de acero a emplear entre el 50,00% y 75,00% (siendo las mejores soluciones las que presentan peraltes de L/4). Respecto a la envolvente, se demuestra que la forma parabólica reduce su superficie frente a sistemas adintelados un 41,86% para peraltes de L/4 y 48,97% para peraltes de L/2. Disminuyen también las tareas de fabricación y montaje gracias a la elección de mallas de una sola capa con la frecuencia adecuada que reduce el número de uniones a fabricar y montar.

La minimización tanto de productos como de tareas a realizar tiene una repercusión favorable en la reducción del impacto medioambiental del sistema propuesto frente a al resto de coberturas analizadas. Así, el impacto obtenido para GWP de 20,0 kgCO₂Eq/m², se reduce un 34,66% respecto a los sistemas más ligeros, Tipo 4, y entre un 67,53% y 77,05% respecto al resto.

El sistema propuesto resulta de gran adaptabilidad a los procesos evolutivos del yacimiento, pudiendo generar coberturas con mínima unión al yacimiento ajustadas a su geometría, e incluso evocando volumetrías que favorezcan la interpretación del yacimiento, con reducidos costes de ejecución y mantenimiento.

Futuras líneas de investigación

Tal como se ha indicado, el modelo propuesto busca la protección efectiva total del yacimiento en función del control higrotérmico de la cámara de aire que se genera. En la actualidad se está construyendo un prototipo monitorizado para evaluar su comportamiento en un caso real tanto en

clima frío como cálido. Los resultados que se obtengan se expondrán en próximos artículos.

Referencias

- ASDRUBALI, F. ET AL. (2017). "A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications". *Build. Environ*, 114, 307-332. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.033>.
- ASLAN, Z. (1997). "Protective Structures for the Conservation and Presentation of Archaeological Sites", *Journal of Conservation and Museum Studies*, 3: 16–20. <https://doi.org/10.5334/jcms.3974>.
- BONELLI, M., y F. BEGLIARDO, H. (2016). "Optimización de Armaduras Planas Mediante Diseño Paramétrico y Algoritmos Genéticos: Efecto de la no Correspondencia Objeto Real-Modelo Idealizado". *Mecánica Computacional*, XXXIV, 501-515.
- CABELLO, C. (2018). "Descubrir para cubrir. ¿Son las cubiertas sobre yacimientos arqueológicos realmente beneficiosas?". En *VI Congreso GEIIC. ¿Y después? Control y mantenimiento del Patrimonio Cultural, una opción sostenible*, Vitoria-Gasteiz: Grupo Español del IIC , 384-389.
- CAMPOREALE, P.E. (2012). "El Uso de Algoritmos Genéticos en el Diseño Paramétrico de Edificios Energéticamente Eficientes: el Coeficiente G y el Consumo Anual de Energía". En *XV Congreso Ibérico y X Congreso Ibero Americano de Energía Solar*. Vigo. Universidad de Vigo, 27-32.
- DÍAZ, S. (2005). "La Conservación de los Yacimientos Arqueológicos In Situ". *Boletín Arkeolan*, 13: 110-130.
- EDMONDS, A. ET AL. (2022). "Parametric Design—A Drive Towards a Sustainable Future". *Innovation in Construction*. Springer: Cham. Ghaffar, S.H. et al. (Eds). https://doi.org/10.1007/978-3-030-95798-8_10.
- FAREZ, J. ET AL. (2019). "Parametric Structural Design". *Arquitecto*, 14, 15-23.
- FRISCHKNECHT, R., ET AL. (2007). *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods: Data v2.0*. Dübendorf, Swiss: Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Ecoinvent Report. 3.
- GALÁN, C. ET AL. (2015). "Embodied energy of conventional load-bearing walls versus natural stabilized earth blocks". *Energy Build*, 97, 146-154. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.054>.
- GIACHENTTI, M. (1994). "Dei Mosaici e Aree Archeologiche: Problema di Competenze e non di Metodología". En *Fifth conference of the international committee for the conservation of mosaics*, Faro e Conimbriga: ICCM, 145-150.
- GÓMEZ, J. C. ET AL. (2017). "Lightweight and Quickly Assembled: the Most Eco-Efficient Model for Architecture". *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 5 (4). 539-550.

GÓMEZ, J. C. ET AL. (2019). "Life cycle assessment as a decision-making tool for selecting building systems in heritage intervention: Case study of Roman Theatre in Itálica, Spain". *Journal of Cleaner Production*. 206. 27-39.

HOLZER, D. ET AL. (2007). "Parametric Design and Structural Optimisation for Early Design Exploration". *International Journal of Architectural Computing*, 4 (5), 625-643.

HUA, H. ET AL. (2022). "Reconfigurable Modular System of Prefabricated Timber Grids". *Computer-Aided Design*, 146, 2022,103230. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2022.103230>.

JUSTE, I., (2022) "Intervenciones arquitectónicas en ámbitos arqueológicos", *PH* 106: 36-61. <https://doi.org/10.33349/2022.106.5045>.

KELLENBERGER, D. (2004). *Life Cycle Inventories of Buildings Products. Data v1.1*. Dübendorf, Swiss: Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Ecoinvent Report. 7.

MATEUS, L. ET AL. (2014). "Architecture and Parametric Design: A Prototype for a Kiosk". En: *High Value Manufacturing. Advance Research Virtual and Rapid Prototyping*, 493-496. London: Bártole et al (Eds). ISBN 978-1-138-00137-4.

MEDLIN, R.L. (1979) "Tipos de Adaptabilidad". *Arquitectura Adaptable 1974*. En Coloquio Internacional Sobre Arquitectura Adaptable Universidad de Stuttgart. Barcelona: Gustavo Gili, (Ed): 136-137.

MONCASTER, A.M. ET AL. (2018). "Why method matters: Temporal, spatial and physical variations in LCA and their impact on choice of structural system". *Energy Build*. 173. 389-398.

NOVYSEDLÁK, P. (2021). "Parametric Design of Tensile Structures". En *International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures*. On line Conference: International Centre for Numerical Methods in Engineering. Barcelona, Spain.

-ORDÓÑEZ, M. y GÓMEZ, J.C., (2020) "Coberturas sostenibles en excavaciones arqueológicas. Metodología de aplicación al caso de mosaicos en el Conjunto Arqueológico de Itálica, Santiponce, Sevilla", *Ge-Conservación* 17: 202-214. <https://doi.org/10.37558/gec.v17i1.757>.

ORDÓÑEZ, M., GÓMEZ, J. ET AL. (2022). "Coberturas de Yacimientos a ras de suelo en el ámbito español. Clasificación tipológica y análisis de protección efectiva". *Ge-conservacion* 22: 90-106. <https://doi.org/10.37558/gec.v22i1.1097>.

PRIETO, N. y QUINTÁNS, E. C. (2021). *Prada Poole: Estructuras de aire, utopías construibles*. Madrid: Asimétricas.

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

ROLAND, C. (1973). *Frei Otto: Estructuras: estudios y trabajos sobre la construcción ligera*. Barcelona: Gustavo Gili.

RUDOLFSKY, B. (1964). *Architecture without architects*. Academy Editions.

SAITO, K.E. ET AL. (2009). "Prototipos con Forma Plegada Animada. In Forma y Contexto". En *VII Congreso Nacional y IV Internacional. Sema 2009*. Tucumán: Fau-Unt. Sema-Arsnoa (Eds).

SCHMIDT, H. (1988). *Schutzbauten*. Stuttgart: Konrad Theiss Verlag.

THOMPSON, D'ARCY (1961). *Sobre el crecimiento y la forma*. London: Cambridge University Press.

Autor/es



Mauel Ordóñez Martín

maormarq@us.es

Departamento de Construcciones Arquitectónicas 1. Universidad de Sevilla. E.T.S. Arquitectura

<https://orcid.org/0000-0002-9804-309>

Licenciado Arquitecto por Universidad de Sevilla (2000). Máster Universitario en Arquitectura y Patrimonio Histórico por Universidad de Sevilla (2005). Máster en Arquitectura y Patrimonio Histórico por Universidad de Sevilla (2012). Profesor Asociado del Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla (2007-Actualidad). Profesor de Máster en Proyecto de Instalaciones en Arquitectura de la Universidad de Sevilla (2011-2018). Miembro del Grupo de Investigación TEP 130: Arquitectura, Patrimonio y Sostenibilidad: Acústica, Iluminación, Óptica y Energía. Doctorando con tesis en redacción: Análisis y Desarrollo de Coberturas Temporales Eficientes en Yacimientos Arqueológicos. Se puede consultar su producción científica completa en: https://investigacion.us.es/sisius/sis_showpub.php?idpers=7429



Juan Carlos Gómez de Cózar

gcozar@us.es

Departamento de Construcciones Arquitectónicas 1. Universidad de Sevilla. E.T.S. Arquitectura

<https://orcid.org/0000-0001-5480-5929>

Dr. Arquitecto. Profesor Titular de Universidad adscrito al Departamento de Construcciones Arquitectónicas 1 en la E.T.S. Arquitectura de la Universidad de Sevilla. Director del Máster Universitario en Innovación en Arquitectura: Tecnología y Diseño (desde el curso 2009/10 hasta la actualidad). Pertenece al Grupo de Investigación TEP 130: Arquitectura, Patrimonio y Sostenibilidad: Acústica, Iluminación, Óptica y Energía. Autor de numerosas publicaciones, patentes y de una amplia trayectoria en transferencia basada en la producción de soluciones ligeras, de rápido montaje y sostenibles para la arquitectura. Se puede consultar su producción científica completa en: https://investigacion.us.es/sisius/sis_showpub.php?idpers=5478



Rosa Mª Benítez Bodes

onuris.arquitectura@gmail.com

Universidad de Sevilla. E.T.S. Arquitectura

<https://orcid.org/0000-0001-5586-5122>

Doctorado en Arquitectura (Universidad de Sevilla). Máster en Arquitectura y Patrimonio (Universidad de Sevilla / IAPH). Técnico Termógrafo Nivel 1 (Infrared Training Center ITC). Autora de varias publicaciones, se puede consultar su trayectoria investigadora y producción científica en: <https://cvn.fecyt.es/0000-0001-5586-5122>

Artículo enviado 24/05/2023
Artículo aceptado el 26/04/2024



<https://doi.org/10.37558/gec.v25i1.1208>