



Coberturas de yacimientos a ras de suelo en el ámbito español. Clasificación tipológica y análisis de protección efectiva

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

Resumen: Este trabajo se centra en el análisis de cubiertas ejecutadas en las últimas tres décadas en el ámbito geográfico español asociado al clima mediterráneo. En este estudio se propone una metodología de análisis basada en la identificación de factores de deterioro, inventario de modelos (atendiendo a definición constructiva, materialidad y adaptabilidad, sistema de evacuación de aguas pluviales y necesidades de mantenimiento), clasificación tipológica y análisis de su efectividad frente a la acción de agentes externos relacionados con la exposición al clima mediante herramientas de simulación de control ambiental. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que es necesario ajustar bastante el diseño de este tipo de coberturas para que puedan proporcionar una protección real a los yacimientos analizados. Del mismo modo, a partir de los resultados obtenidos, se aportan parámetros de correcto diseño que guiarán futuras propuestas orientadas a la protección efectiva de estos bienes patrimoniales.

Palabras clave: Sostenibilidad, conservación preventiva, coberturas activas, excavación arqueológica, simulación numérica, control ambiental

The coverage of archaeological sites at ground level in Spain, from a vision of effective protection

Abstract: This work focuses on the analysis of coverages carried out in the last three decades in the Spanish geographical area associated with the Mediterranean climate. This study proposes a methodology of analysis based on the identification of deterioration factors, inventory of models (according to constructive definition, materiality and adaptability, rainwater evacuation system and maintenance needs), typological classification and analysis of their effectiveness against the action of external agents related to exposure to the climate through environmental control simulation tools. The obtained results show that it is necessary to adjust the design of this type of coverages quite a bit so that they can provide real protection to the analysed archaeological sites. In the same way, based on these obtained results, correct design parameters which will guide future proposals aimed at the effective protection of these heritage sites are provided.

Keywords: Sustainability, preventive conservation, active coverages, archaeological excavation, numerical simulation, environmental control

A cobertura de sítios arqueológicos ao nível do solo em Espanha, a partir de uma visão de protecção eficaz

Resumo: No âmbito da trajectória, avançada em trabalhos anteriores, no campo da concepção e simulação de modelos de cobertura para sítios arqueológicos ao nível do solo, com capacidade de controlo ambiental do espaço coberto, este trabalho centra-se na análise retrospectiva de modelos de cobertura executados nas últimas três décadas na área geográfica espanhola associada ao clima mediterrânico, analisando a sua eficácia em termos da sua capacidade de proteger os elementos escavados. Este estudo propõe uma metodologia de análise baseada na identificação de factores de deterioração, inventário de modelos, classificação tipológica (segundo a sua geometria, materialidade e adaptabilidade) e a análise, através de ferramentas de simulação de controlo ambiental, da sua eficácia contra a acção de agentes externos relacionados com a exposição ao clima. Os resultados obtidos mostram que é necessário ajustar o desenho deste tipo de cobertura, a fim de proporcionar uma protecção real aos sítios analisados. Da mesma forma, os resultados obtidos fornecem parâmetros de concepção correcta que orientarão futuras propostas que visem a musealização destes bens patrimoniais.

Palavras-chave: Sustentabilidade, conservação preventiva, coberturas activas, escavação arqueológica, simulação numérica, controlo ambiental

Antecedentes

Hoy en día existe un consenso claro dentro de la disciplina de la conservación preventiva de yacimientos arqueológicos a cota de suelo en relación a que la única estrategia viable para la preservación de dichos bienes patrimoniales pasa por la cobertura de los mismos (Sposito y Ruggieri Tricoli 2004) (Díaz 2005: 110-130) (Rodríguez Temiño 2014). A lo largo del siglo pasado se comienzan a sentar las bases de las estrategias que aspiran a acercar al yacimiento in-situ a las condiciones de conservación de una vitrina museológica, planteando la necesidad de compaginar los requisitos protectores con la musealización de las excavaciones como meta irrenunciable (Stanley Price 1984). Desde las primeras intervenciones de Franco Minissi en Piazza Armerina en Sicilia en la década de los 60 (Rodríguez Temiño 2014), dicho entendimiento ha llevado durante años a la ejecución de gran variedad de cubiertas de distinta materialidad, en general con carácter permanente, en un intento de preservar la realidad física y los valores de los yacimientos.

Se pueden encontrar en la bibliografía, tanto en el ámbito teórico como en la relativa a análisis de proyectos de cobertura, reflexiones sobre la idoneidad de las mismas desde diferentes enfoques, aportando todas ellas diversos valores desde una visión pluridisciplinar.

En la década de los 80 del s. XX, se exponen importantes reflexiones sobre las necesidades a cubrir por parte de las cubiertas que empezaban a implantarse. En el Third International Symposium on Mudbrick, celebrado en Ankara en 1980, se habla de un factor que hoy se entendería como de sostenibilidad, fijando como parámetro clave en las intervenciones de protección arqueológica, lo idóneo de ser ejecutadas con materiales disponibles en el entorno. Igualmente se determinan ya como parámetros necesarios algunos como la protección contra la erosión y la lluvia, aislamiento térmico suficiente o permeabilidad al vapor de agua para evitar fenómenos de condensación, factores que tienen que ver con el control de la higrometría de la excavación.

Se establecen también planteamientos innovadores como la posibilidad de diseñar cubiertas con estructuras infladas que permiten, por su lógica de estabilidad neumática, la posibilidad de garantizar la renovación de aire en el interior del espacio cubierto e incluso el control térmico del mismo (Barker 1986: 45-49). Se realizan intentos de clasificación de las cubiertas que se están aplicando, distinguiendo entre cubiertas ajustadas a la geometría del yacimiento y cubiertas sin relación formal (Schmidt 1988), en una reflexión sobre la incidencia de las cubiertas en el entendimiento del objeto excavado. En los años 90, surgen nuevas reflexiones, análisis y clasificaciones en base al impacto físico y formal (Giachentti 1994), distinguiendo entre cubiertas

con escasa unión al yacimiento, cubiertas que evocan en exceso el volumen original o cubiertas con impacto violento sobre el mismo. A partir de ese momento se realizan los primeros estudios que evidencian que los modelos de cubiertas que se vienen implantando deben ser analizados en cuanto a la efectividad de protección contra los agentes ambientales. Un ejemplo sería la monitorización de la cubierta ligera para el templo de Apolo en Bassae, donde se toman datos de T^a y humedad relativa (Theoulakis 1993: 808-813), o el caso de la toma de datos meteorológicos en una cubierta modular desmontable en aluminio, de geometría hexagonal y rápido montaje, en Chipre (Agnew y Maekawa 1996: 139-150). Se analizan cubiertas de materialidad diversa (vidrio, acero, madera), en ocasiones concebidas como temporales, pero cuya instalación tiene finalmente permanencia, evidenciándose desajustes de las mismas con las necesidades de protección física y de los valores del yacimiento bien por impacto paisajístico o ineficiencia en la protección frente al viento, la lluvia, choques térmicos o desecaciones excesivos (Aslan 1997: 16-20).

A partir del año 2000 se aborda el problema de efectividad y adecuación de proyectos de cobertura ejecutados con mayor profundidad técnica gracias al desarrollo de sistemas de modelización, monitorización y análisis avanzados. Se analizan actuaciones que van desde cubiertas temporales hasta coberturas permanentes con o sin adaptación fisiológica a la excavación (Sposito y Ruggieri 2004). La bibliografía científica actual aboga por un necesario enfoque interdisciplinar en las actuaciones de cobertura (Germana 2013), poniendo en crisis aquellas donde prima la impronta arquitectónica sin consideración de las variables ambientales a controlar (Roby y Demas 2012). Se detecta que, en general, se ha descuidado la atención al diseño de cubiertas de estructuras ligeras con escaso impacto físico y fácil mantenimiento, con un buen rendimiento en cuanto a control climático del espacio cubierto (Rodríguez Temiño 2014), dificultando así el desarrollo de la idea de trasladar al espacio exterior in situ la capacidad de control de las condiciones ambientales de una vitrina favoreciendo la musealización de los yacimientos. Algunos estudios sobre el comportamiento a largo plazo de las cubiertas ejecutadas en la última década concluyen que, en general, las estrategias seguidas no han atenuado suficientemente, e incluso en algunos casos han empeorado, los procesos físicos y químicos de alteración que sufren los objetos excavados (Cabello Briones 2017). Es el caso de la modificación de las condiciones psicrométricas que generan fluctuaciones excesivas de T^a o humedad, o inciden negativamente en la velocidad del viento del espacio cubierto con fenómenos de turbulencia, provocando cristalización de sales, deposiciones de partículas y aparición de microflora, o el caso de una insuficiente superficie de cobertura y/o el empleo de materiales inadecuados que no evitan el exceso de radiación incidente. Por

ello se establece como una acción absolutamente necesaria la monitorización de la totalidad de variables psicrométricas que tienen incidencia sobre los fenómenos de alteración, con el fin de chequear la idoneidad de las intervenciones (Baglioni y Cacace 2018: 198-205; Cabello Briones 2020 a: 38-51), realizándose incluso estudios a partir de ensayos geomorfológicos de probetas físicas colocadas in situ bajo la cobertura (Cabello Briones 2017: 34-41).

Por otra parte, el desarrollo de herramientas de simulación va a permitir el desarrollo de metodologías de evaluación del comportamiento de las futuras coberturas empleando sistemas de modelado a partir de algoritmos matemáticos, los cuales serán capaces de optimizar propiedades mecánicas y de flexibilidad ante el objeto a proteger, facilitando la adaptabilidad a la evolución del yacimiento con una optimización material de las mismas (Sbrogio y Basso 2021:1547-1558). Igualmente, se están desarrollando investigaciones donde se incorpora, adicionalmente a la optimización estructural del modelo de cobertura, el análisis del control de la totalidad de variables psicrométricas del espacio cubierto, empleando envolventes de doble capa, y su simulación mediante herramientas de análisis de dinámica de fluidos computacional CFD (Ordóñez y Gómez de Cózar 2020: 202-214) con el fin de garantizar el control efectivo de las variables de alteración. Los estudios actuales están siendo capaces de aportar una gran cantidad de variables que intervendrán en el futuro diseño de coberturas (Panoskaltis y Vanta-Vasilki 2019) tales como: mínimo apoyo, rápido montaje, reversibilidad, control HVAC mediante energías renovables, automatización, etc.

A partir de los antecedentes descritos, en el presente artículo se analizan las coberturas de yacimientos ejecutadas en las últimas décadas en el ámbito geográfico español asociado al clima mediterráneo, a partir de los objetivos y metodología que se presentan a continuación.

Objetivos

Los objetivos de esta investigación son los siguientes:

Desarrollo de una clasificación de coberturas de yacimientos arqueológicos a ras de suelo, en el ámbito geográfico español asociado al clima mediterráneo en las tres últimas décadas, atendiendo a su configuración constructiva, materialidad, capacidad de adaptación al contexto, posibilidades de evacuación de aguas y tareas necesarias de mantenimiento.

Análisis de los tipos de coberturas detectadas mediante software de control ambiental, para determinar su capacidad de protección frente a agentes externos que dañan al yacimiento.

Metodología

A partir de los antecedentes descritos y de los objetivos que se han definido, se propone la siguiente metodología original:

- *Clasificación de agentes externos que deterioran los yacimientos.*
- *Realización de inventario de soluciones de yacimientos existentes en el ámbito geográfico español asociado al clima mediterráneo atendiendo a los siguientes parámetros: tipo de yacimiento, configuración constructiva, materialidad, capacidad de adaptación al contexto, posibilidades de evacuación de aguas y tareas necesarias de mantenimiento.*
- *Clasificación tipológica del inventario anterior en función de los parámetros definidos que influyen necesariamente en el control de los agentes de deterioro del yacimiento.*
- *Análisis de la efectividad de cada tipo detectado mediante el uso de software de control ambiental que simule los siguientes efectos: capacidad de la cubierta para producir sombra, radiación solar que recibe el yacimiento y acción del viento sobre la cubierta y el yacimiento.*
- *Discusión de resultados.*

Clasificación de agentes externos de deterioro

A la hora de determinar los agentes de alteración de los yacimientos a ras de suelo a analizar, se parte de la premisa de aspirar a la consecución de futuras coberturas que garanticen condiciones de control climático lo más próximas posibles a una vitrina de museo (Price 1984), siendo capaces de integrar en la excavación objetos extraídos de la misma, de materialidad diversa. Por ello se incorpora a este estudio la Tabla 1 que expone dichos factores de alteración, así como sus efectos más allá de las propias fábricas excavadas, extendiéndolo a materiales como la cerámica, los metales o el vidrio (Martirena 1992: 177-224) (Díaz 2005: 110-130).

Inventario de soluciones de cobertura de yacimientos existentes

Siguiendo con la metodología mencionada, se ha realizado un inventario de actuaciones representativas de cobertura de yacimientos en el ámbito español, en un ámbito temporal retrospectivo de 35 años [Tabla 2] con el fin de poder elaborar una clasificación tipológica en base a parámetros como: su carácter abierto o cerrado, su capacidad de control ambiental, su versatilidad, su materialidad constructiva, su compatibilidad con trabajos de excavación y musealización, el sistema de recogida de aguas pluviales o sus necesidades de mantenimiento. Tras la Tabla 2, se muestran en la Figura 1 [Figura 1] los croquis de una selección de las cubiertas inventariadas que sirven de base para su análisis.

Material Arqueológico	Principales Factores de alteración	Efectos
Metales y Aleaciones	-Variación humedad. (Según composición) -Impurezas del aire. (Según composición)	-Corrosión por oxidación
Minerales y Rocas	-Gases atmosféricos: CO ₂ , oxígeno y vapor de agua. -Acumulación de sales solubles por: agua en suelo, polución, residuos minerales, factores biológicos y conservación inadecuada, acompañadas de cambios de humedad. -Agua de lluvia -Acción del viento. -Radiación solar. -Falta de ventilación. -Fluctuaciones excesivas de T ^a y humedad.	-Reacciones de oxidación, hidratación y deshidratación que transforman sus componentes. -Eflorescencias, manchas de humedad, costras, pérdida de cohesión, fisuras y desprendimientos. -Disoluciones y formación de costras salina. -Abrasión y erosión. -Unidos a la humedad, formación de crecimientos vegetales. -Pérdida de color de pigmentos por acción ultravioleta. -Aparición de humedades de condensación. -Fracturas por heladicidad y tensiones mecánicas.
Cerámica	-Sales solubles.	-Fisuras y desprendimientos por aumento de presión en materiales porosos por la cristalización de sales.
Vidrio	-Absorción de agua. -Cambios bruscos de humedad. -Gas atmosférico.	- Reacción química ácida, con formación de capa de sílice porosa, o básica, con formación de una sal soluble, con destrucción total del vidrio. - Hidróxido de calcio y óxido de sodio presentes en el vidrio, se transforman en carbonatos, que son higroscópicos, por lo que los cambios bruscos de humedad debilitan su estructura. -SO ₂ y CO ₂ se combinan con el agua, acelerando el ataque químico del vidrio al formar compuestos hidrófilos.
Materiales Orgánicos celulares. (De origen vegetal o animal).	<i>Orgánicos menos sensibles. (Madera, cestería, lacas).</i> -Luz (iluminancia > 150 lux) -Procesos de humedad-sequedad. -Insectos y Hongos. <i>Orgánicos más sensibles. (Papel y textiles).</i> -Luz (iluminancia > 50 lux), cambios bruscos de temperatura y humedad, y ataques biológicos y condiciones atmosféricas ácidas en papel. -Luz (iluminancia > 50 lux), atmósferas alcalinas, insectos y variaciones de humedad en textiles.	-Foto degradación. Aparición de hongos cromógenos. -Humedad favorece aparición de hongos y pudrición. -Insectos consumen el material para su alimentación. -Hongos favorecen la retención de humedad, y por tanto la pudrición. -Foto degradación, consumo del material por insectos en presencia de humedad. Ataque químico de ácidos de la atmósfera sobre las fibras de celulosa. -Luz provoca cambios de coloración y debilitamiento mecánico del textil. Una atmósfera alcalina degrada las fibras animales. Oxidación de alfileres, o del agente de blanqueamiento del textil. Insectos, hongos y bacterias consumen el material. Las variaciones de humedad provocan tensiones mecánicas y eliminan la elasticidad del textil.
Cuero	-Deseccación. -Altas temperaturas. -Combinación de humedad y altas temperaturas. -Ambientes ácidos. -Polillas y abejas.	-Fisuración del material por pérdida de elasticidad. -Combinación de humedad y calor lo convierten en cola. -El ambiente ácido destruye el colágeno. -Los insectos consumen el material.
Hueso, Marfil, Cuerna	-Humedad relativa baja. -Altas temperaturas. -Medio ambiente ácido. -Medio ambiente básico.	-Tensiones y figuraciones. -Deseccaciones. -Ambiente ácido ataca a la componente inorgánica. -Ambiente básico ataca a la componente orgánica.
Materiales orgánicos no celulares y plásticos. (Aceite, cera, resina, goma...)	-Temperatura moderada + oxígeno. -Radiación + oxígeno.	-Envejecimiento químico termo-oxidativo. -Envejecimiento fotoquímico.

Tabla 1.- Resumen de principales factores de alteración y sus efectos sobre objetos excavados.

Denominación Situación, Fecha, Promotor.	Abierto ó Cerrado/Control Ambiental (Tª, Hum, Nivel Co2...).	Dimensiones Aprox. Anch./Larg./Alt. (m).	Geometría/¿Adaptable/Compatible con excavación, visita pública.	Materialidad Sistema Constructivo/ Encuentro con el suelo.	Sistema de recogida de aguas pluviales.	Principales labores de mantenimiento.
Termas de Augusta Bilbilis. Huérmeda. (Zaragoza). 1997. Ministerio de Cultura y Deporte	Abierto./Sin control.	12/25/10	Rectangular nave a dos aguas./No/Sí.	Estructura de acero triangulada de arcos con uniones soldadas y cubierta de paneles de policarbonato./Arcos sobre muros emergentes del yacimiento, con placas de acero y pernos.	No/Vertido libre de faldones a perímetro de yacimiento.	Protección corrosión estructura./Sustitución paños translúcidos degradados.
Cisternas Romanas. Molacillos. (Zamora). 2010. Junta de Castilla y León.	Abierto./Sin control.	11/18/4,5	Unión de dos naves a dos aguas./Sí, módulo base reproducible./Sí.	Estructura de pórticos de acero con uniones soldadas. Cubierta de chapa de acero sobre tablero de madera./Pilares sobre durmientes de acero, anclados a muretes de hormigón armado.	No/Vertido libre de faldones y canales a perímetro de yacimiento.	Protección corrosión estructura./Limpieza canales.
Tumba de las Guirnaldas. Carmona (Sevilla). 2011. Conjunto Arqueológico de Carmona.	Abierto./Sin control.	19/22,5/5,67	Irregular poliédrica adaptada a excavación./No/Sí.	Pórticos y estructuras trianguladas de acero laminado en uniones soldadas. Cubierta de tablero de madera con aislamiento térmico y acabado con lámina impermeabilizante./Pilares con base de trípode sobre micropilotes de 9 m de longitud.	Sí/Canalones conducidos por bajantes a colectores enterrados, evaluando a caminos exteriores.	Protección corrosión estructura./Limpieza canales.
Yacimiento Medieval de Siyása. Cieza (Murcia). 2018. Consorcio Turístico Desfiladera de Almadenes.	Abierto./Sin control.	64/44/3	Irregular adaptada a yacimiento, cubierta plana con lucernarios. /No/ Sí	Losas de hormigón armado sobre soportes tubulares de acero./Soportes entre estructuras emergentes, con cimentación superficial de dados de hormigón	No/Vertido libre de losas a terreno perimetral al yacimiento.	Protección corrosión estructura/ impermeabilización cubierta.
Villa romana de L'Albir. Alfaz del Pi (Alicante). 2010. Ayuntamiento de L'Alfàs del Pi.	Abierto./Sin control.	16/32/7	Rectangular achaflanada, cubierta de módulos abovedados./Sí, estructura modular ampliable./Sí.	Celosía espacial triangulada de acero y cubierta textil atirantada./Pilares sobre dados de hormigón de 60x60 cm de 30 cm de profundidad.	Sí./Canalones conectados a bajantes hasta zanja drenante perimetral conectada con saneamiento.	Protección corrosión estructura./Tensado membranas textiles./Limpieza canales.
Villa Romana Torre Llauder. Mataró (Barcelona). 2010, Ayuntamiento de Mataró.	Abierto./Sin control.	21/24/8	Rectangular tipo carpa con apoyo central./Sí, ampliable con módulo similar./Sí.	Estructura textil atirantada con 14 puntos de anclaje y mástil central./Mástil mediante cimentación superficial de dado de hormigón, y anclaje exteriores mediante placas de acero y pernos anclados al terreno, sin contacto con excavación.	Sí./Bajantes en vértices de membrana textil, conducido a drenante perimetral.	Protección corrosión estructura./Tensado de membranas textiles.
Yacimiento del Cerro de la Merced. Cabra (Córdoba). 2019. Ayuntamiento de Cabra.	Abierto./Sin control.	17/22/6	Rectangular con lados menores curvos, cubierta mediante superficie reglada./No./Sí.	Estructura de arcos tubulares de acero en unión soldada, cubierta textil atirantada a estructura./6 apoyos puntuales unificando arcos dos a dos, con cimentación superficial de dados de hormigón en perímetro de excavación.	No./Vertido libre de membrana a terreno perimetral al yacimiento.	Protección corrosión estructura./Tensado de membranas textiles.
Dolmen de Albeite. Los Llanos de Villamartín. (Cádiz). 2005. Diputación de Cádiz.	Abierto./Sin control.	20/18/4,5	Rectangular de lados curvos, cubierta de simple curvatura./No./Sí.	Malla curva de perfiles tubulares de acero en unión soldada y cubierta de paneles ligeros./4 pedestales de hormigón con cimentación superficial, externos a estructuras emergentes.	No/Vertido libre de cubierta a terreno perimetral al yacimiento.	Protección corrosión estructura.
Yacimiento arqueológico de Cancho Roano. Zalamea de la Serena. (Badajoz). 2000. Ayuntamiento de Zalamea de la Serena.	Abierto./Sin control.	48/45/9	Rectangular de paños inclinados./Sí, Malla triangulada modular./Sí.	Mallas espaciales trianguladas atornilladas de grandes luces, separadas por lucernarios, sobre soportes de perfiles simples de acero. Cubierta de chapa grecada de acero y paneles translúcidos./Soportes de grandes luces con cimentación superficial de dados de hormigón exteriores al yacimiento.	No/Vertido libre de canales de cubierta volada a terreno exterior al yacimiento.	Protección corrosión estructura./Limpieza canales./Sustitución paños translúcidos degradados.
Casa del Anfiteatro. Mérida (Badajoz). 2015. Consorcio Ciudad Monumental de Mérida.	Abierto./Sin control.	60/70/3,5	Irregular adaptada a yacimiento, cubierta inclinada./No/ Sí.	Malla espacial triangulada de perfiles de aluminio atornillados sobre soportes de acero. Cubierta textil atirantada a la estructura./Soportes de grandes luces exteriores al yacimiento sobre dados de hormigón, algunos apoyos interiores sobre muros de hormigón.	No/Vertido libre a terreno perimetral al yacimiento.	Protección corrosión pilares./Tensado de membranas textiles./Revisión uniones atornilladas.

Tabla 2.- (parte 1): Tabla resumen de características del inventario de coberturas analizado.

Yacimiento arqueológico de Cancho Roano. Zalamea de la Serena. (Badajoz). 2000. Ayuntamiento de Zalamea de la Serena.	Abierto./Sin control.	48/45/9	Rectangular de paños inclinados./Sí, Malla triangulada modular./Sí.	Mallas espaciales trianguladas atornilladas de grandes luces, separadas por lucernarios, sobre soportes de perfiles simples de acero. Cubierta de chapa grecada de acero y paneles translúcidos./Soportes de grandes luces con cimentación superficial de dados de hormigón exteriores al yacimiento.	No./Vertido libre de canales de cubierta volada a terreno exterior al yacimiento.	Protección corrosión estructura./Limpieza canalones./Sustitución paños translúcidos degradados.
Casa del Anfiteatro. Mérida (Badajoz). 2015. Consorcio Ciudad Monumental de Mérida.	Abierto./Sin control.	60/70/3,5	Irregular adaptada a yacimiento, cubierta inclinada./No/Sí.	Malla espacial triangulada de perfiles de aluminio atornillados sobre soportes de acero. Cubierta textil atirantada a la estructura./Soportes de grandes luces exteriores al yacimiento sobre dados de hormigón, algunos apoyos interiores sobre muros de hormigón.	No/Vertido libre a terreno perimetral al yacimiento.	Protección corrosión pilares./Tensado de membranas textiles./Revisión uniones atornilladas.
Villa Romana Fuente Álamo. Puente Genil (Córdoba). 2018. Ministerio de Fomento y Ayuntamiento de Puente Genil.	Abierto./Sin control.	27/56/8	Rectangular, cubierta inclinada./Sí. Ampliable por adición de pórticos./Sí.	Pórticos de vigas y pilares de estructuras planas trianguladas en unión soldada. Cubierta de textil tensado./Pilares de pórticos sobre encepados y micropilotes anexos a estructuras emergentes.	No./Vertido libre a terreno perimetral al yacimiento.	Protección corrosión estructura./Tensado de membranas textiles.
Parque arqueológico de Cartagena. Cartagena (Murcia), 2008. Cartagena Puerto de Culturas.	Abierto./Sin control.	27/78/12	Irregular adaptada a yacimiento, cubierta poliédrica inclinada./No./Sí.	Malla espacial de acero laminado sobre soportes tubulares de acero. Cubierta translúcida de paneles de policarbonato./Soportes de grandes luces sobre encepados y micropilotes.	No./Vertido libre a terreno perimetral al yacimiento.	Protección corrosión estructura./Sustitución paños translúcidos degradados.
Villa Romana de Materno. Carranque (Toledo). 2021. Consejería Cultura Castilla la Mancha.	Semi-abierto/Sin control. Protección parcial mediante cerramiento perimetral ciego a media altura.	48,62/48,42/7	Rectangular, cubierta de simple curvatura./No/Sí.	Pórticos de cerchas planas curvas de acero sobre pilares metálicos. Cubierta de paneles sándwich de acero prelacado con aislamiento térmico. Cerramiento a media altura de citara de ladrillo perforado./Apoyo de pórticos en perímetro externos al yacimiento, e interiores puntuales, cimentación superficial de dados de hormigón.	Sí./Canalones y bajantes canalizados hacia exterior del yacimiento.	Protección corrosión estructura./Limpieza canalones./Pintura elementos de fábrica.
Yacimiento de Fuente Nueva. Orce (Granada). 2021. Ayuntamiento de Orce.	Semi-abierto./Iluminación natural selectiva y ventilación natural por fachada celosía, con control de incidencia solar directa.	20,15/31,40/8,30	Rectangular, cubierta de simple curvatura./No/Sí.	Pórticos planos de cerchas curvas de acero sobre pilares metálicos en unión soldada. Cubierta de chapa grecada de acero prelacado. Cerramiento a base de celosías de lamas de acero./Apoyo de pórticos en zapatas corridas perimetrales, externas a estructuras emergentes.	No./Vertido libre a perímetro exterior protegido por solera de hormigón.	Protección contra corrosión de estructura y celosías de fachada.
Edificio Cristiano de Cástulo (s.IV). Linares (Jaén). 2017. Diputación Provincial de Jaén.	Semi-abierto./Iluminación natural selectiva y ventilación natural a través de fachada celosía y huecos.	12/16/5	Rectangular, cubierta a dos aguas./No./Sí.	Pórticos planos de vigas y pilares de acero en unión soldada. Cubierta de panel sándwich de acero prelacado. Cerramiento parcial de celosías de lamas de acero./Soportes sobre durmientes de acero anclados a estructuras emergentes.	Sí./Canalones y bajantes canalizados hacia exterior del yacimiento.	Protección corrosión estructura y celosías./Limpieza canalones.
Dolmen de Dombate. Cabaña de Bergantiños (La Coruña). 2011. Diputación de La Coruña.	Semi-abierto./Iluminación natural selectiva y ventilación natural para control de humedad por fachada y cubierta./Drenaje y muros pantalla en subsuelo para evitar humedad del terreno.	35/35/6	Estructura de arcos de doble curvatura y cubierta a cuatro aguas./No./Sí.	Bóveda de doble curvatura de arcos de madera, sobre durmiente de madera y soportes tubulares de acero en uniones atornilladas o por esterotomía. Cubierta ventilada de chapa de cobre sobre tablero de madera con aislamiento térmico. Cerramiento de vidrio termoacústico con celosía de lamas metálicas./Soportes externo al excavación sobre muros de concreción de hormigón.	Sí./Recogida mediante canalón y zanja drenante perimetral con canalización a alcantarillado.	Protección corrosión pilares./Revisión uniones atornilladas./Limpieza canalones y vidrios.

Tabla 2.- (parte 2): Tabla resumen de características del inventario de coberturas analizado.

Tejada. Quintanilla de la Cueva (Palencia). 1986. Diputación Provincial de Palencia.	nación natural selectiva mediante paneles traslúcidos en cubierta.		dos aguas./No./Sí.	chas trianguladas sobre pilares de acero. Cerramiento perimetral de fábrica. Cubierta de fibrocemento con zonas de placas translúcidas./Soportes sobre zanjas corridas superficiales o dados de hormigón, en algunos casos entre estructuras emergentes.	y bajantes canalizados hacia exterior del yacimiento.	corrosión estructura./Sustitución placas translúcidas degradadas./Limpieza canales./Pintado elementos fábrica.
Villa Fortunatus. Fraga (Huesca). 2008. Gobierno de Aragón.	Cerrado./Iluminación selectiva a través de fachada mediante paños de vidrio.	42/53/4	Nave cerrada. Cubierta con ligera inclinación./Sí. Ampliable por adición de pórticos./Sí.	Estructura de vigas y pilares de celosía espacial de acero en unión soldada. Cubierta de chapa grecada de acero prelacado. Cerramiento de paneles de poliéster traslúcido./Soportes en perímetro y en interior junto a estructuras emergentes, sobre dados de hormigón superficiales.	Sí./Canalones y bajantes canalizados hacia exterior del yacimiento	Protección corrosión estructura./Limpieza canales./Sustitución placas translúcidas degradadas.
Villa Romana de La Olmeda. Pedrosa de la Vega (Palencia). 2009. Diputación Provincial de Palencia.	Cerrado./Iluminación selectiva a través de fachada mediante paneles translúcidos.	101,25/75/11,75	Nave cerrada por sucesión de bóvedas./No./Sí.	Bóvedas de retícula modular romboidal prefabricada y ensamblada mediante nudos atornillados sobre pórticos de acero laminado en unión soldada. Cubierta de chapa de aluminio con aislamiento térmico. Cerramiento de muro de hormigón armado, paneles de policarbonato celular y chapa de acero corten perforada./Soportes exteriores en muro de hormigón perimetral e interiores en cimentación superficial de zapatas aisladas.	Sí./Canalones y bajantes canalizados hacia red de alcantarillado.	Protección corrosión estructura./Revisión uniones atornilladas./Sustitución paneles translúcidos degradados./Limpieza canales.

Tabla 2.- (parte 3): Tabla resumen de características del inventario de coberturas analizado.

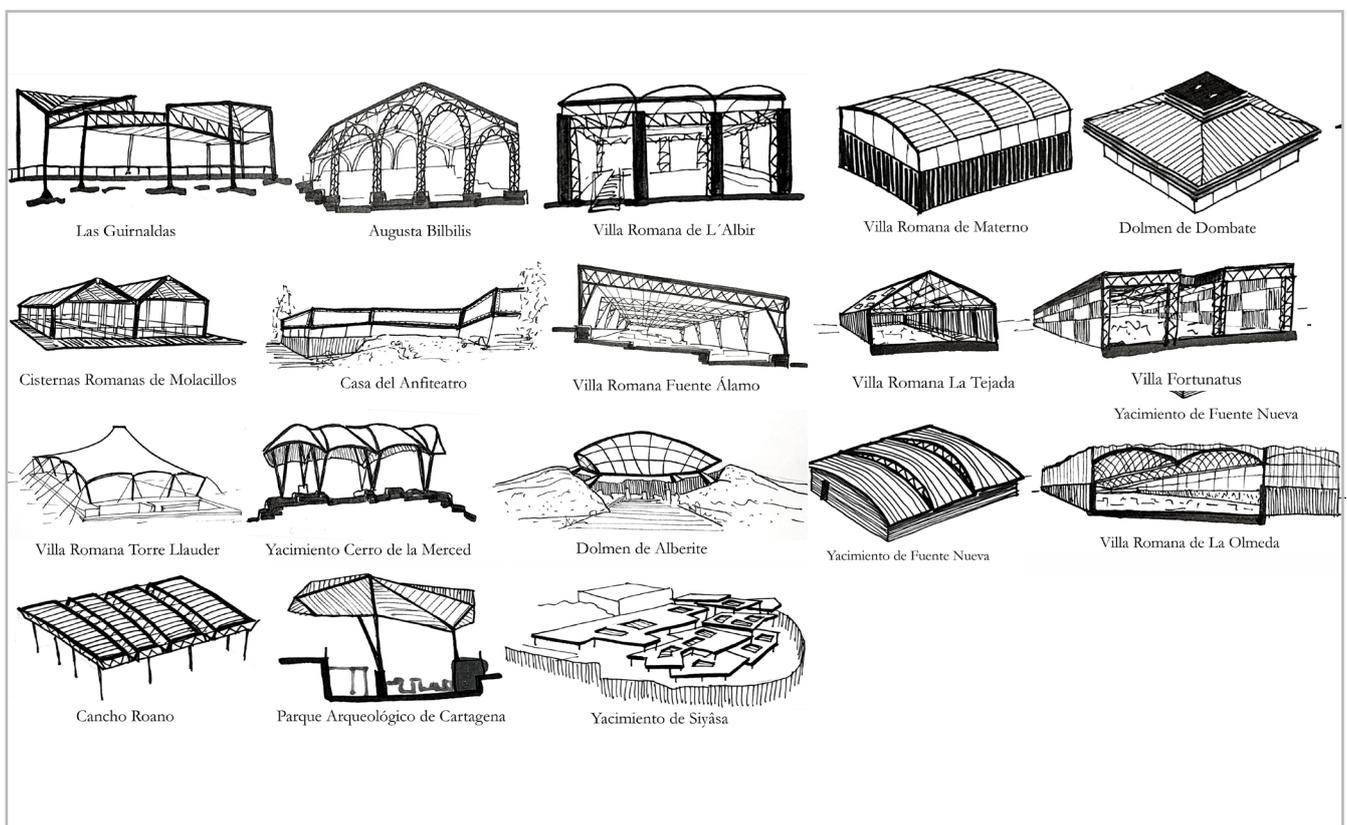


Figura 1.- Croquis de las cubiertas inventariadas.

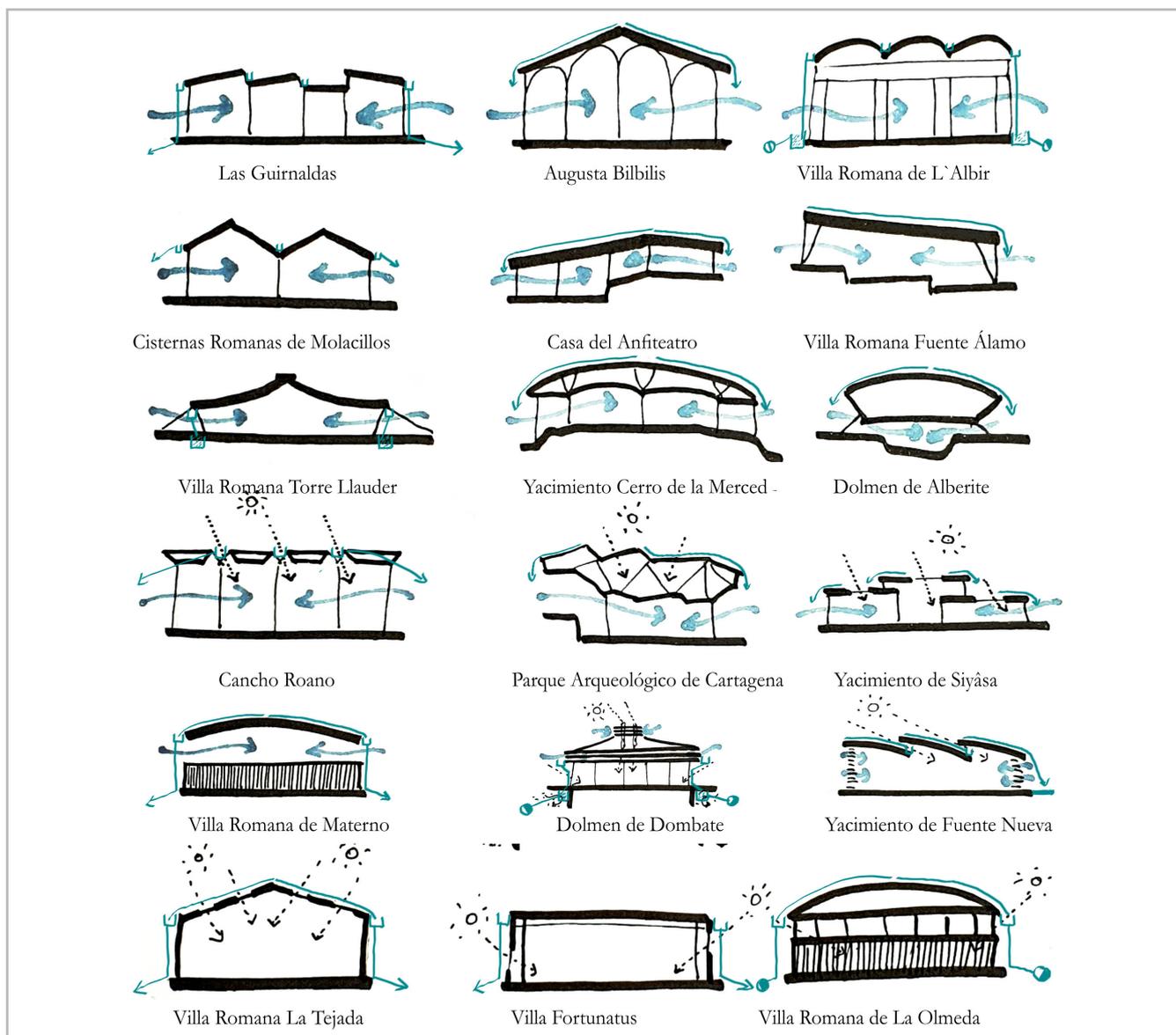


Figura 2.- Mosaico de esquemas de análisis de las cubiertas inventariadas.

Como parte de la metodología de análisis, se han realizado esquemas básicos en sección del comportamiento de las coberturas inventariadas [Figura 2].

En ellos se observa que, a pesar de la diversidad de diseños de cubiertas, a efectos del análisis de su eficacia de protección del yacimiento frente a los agentes atmosféricos y su variabilidad, los modelos se reducen a tres grandes grupos: coberturas abiertas (protección horizontal solar y de lluvia, con ventilación), coberturas semi-abiertas (protección horizontal y vertical parcial, solar y de lluvia, con ventilación) y coberturas cerradas (protección completa frente a sol y lluvia, con control de iluminación).

Clasificación tipológica.

Como tercer paso de la metodología, se establece una clasificación tipológica de los modelos de cubierta

analizados, en base a los parámetros definidos en la Tabla 2 del apartado anterior, que influyen necesariamente en el control de los agentes de deterioro de los objetos excavados.

a) Tipo A. Coberturas abiertas.

En esta tipología, el principal objetivo es proteger el yacimiento de los fenómenos de soleamiento y precipitaciones, con mayor o menor efectividad, ajustándose en general su perímetro al estricto de la excavación. Se observan cubiertas de diversa materialidad, predominando las estructuras ligeras con soportes de acero o aluminio, con incidencia limitada en sus apoyos sobre las estructuras emergentes. Cuentan con material de cobertura diverso, desde ligeros como láminas textiles o placas de policarbonato hasta pesadas losas de hormigón *in-situ*, pasando por tableros de madera y chapas perfiladas de acero con o sin aislamiento térmico.

Son cubiertas que, a priori, presentan un limitado efecto ante los agentes de alteración definidos en la Tabla 1, al tratarse de estructuras abiertas. Su efectividad ante la acción de la radiación solar, especialmente en las localizaciones al sur de la península, la erosión y cambios de humedad por acción de la lluvia o la erosión por acción del viento, estará directamente relacionada con la configuración y la altura de las mismas, la ubicación de huecos o lucernarios y su capacidad de adaptación/ampliación en función de la evolución de las excavaciones. Igualmente, influirá el control de las escorrentías de aguas pluviales, encontrando, en numerosos casos, soluciones de vertido libre de las cubiertas al perímetro de la excavación, con mayor o menor vuelo de la cubierta. En otros casos, sin embargo, se prevé su recogida mediante canalones, y su canalización a zanjas drenantes, zonas alejadas de la excavación, o red de alcantarillado.

En lo relativo a operaciones periódicas de mantenimiento, no resultarán de gran entidad y suelen referirse a los elementos estructurales (tratamiento anti-corrosión de estructuras de acero soldadas, revisión de uniones en estructuras atornilladas o tensado en caso de estructuras de membrana). También es común la limpieza de elementos de evacuación de aguas cuando se cuenta con ellos. Excepcionalmente, se puede presentar la necesidad de sustitución de elementos degradados como los paños de material translúcido.

Hay casos de cubiertas de gran altura, con valores entre 5,0 y 10,0 m, como en la Tumba de las Guirnaldas, las Termas de Augusta Bilbilis, la Villa Romana de L'Albir o la Villa Romana de Fuente Álamo, donde además su perímetro se ajusta a los límites de la excavación, no pareciendo sistemas efectivos ante la radiación solar en períodos de trayectorias solares de menor altura, ni ante la acción de vientos dominantes y su combinación con precipitaciones.

En otros casos se trata de coberturas de altura más ajustada en cuanto a su perímetro inferior, con valores en torno a 3,0 m., como las Cisternas Romanas de Molacillos, la Casa del Anfiteatro, la Villa Romana de Torre Llauder, el Yacimiento del Cerro de la Merced o el Dolmen de Alberite. En ellos se prevé mayor efectividad ante los agentes de viento y lluvia, dependiendo del grado de protección ante el fenómeno de radiación solar, la orientación, la geometría y la mayor o menor opacidad del material de cubierta.

Por otra parte, se detectan coberturas cuyo lenguaje de diseño combinado con situaciones de gran altura o no, con existencia de huecos a modo de lucernarios en cubierta, como el Yacimiento de Cancho Roano o el Yacimiento Medieval de Siyâsa, e incluso con elección de materiales translúcidos en las mismas como en el Parque Arqueológico de Cartagena, disminuye o empeora su capacidad efectiva de protección ante los efectos de la radiación puntual o generalizada sobre el yacimiento, así como el bienestar de los usuarios.

b) Tipo B. Coberturas de tipo semi-abierto.

En este grupo se incluyen ejemplos de cubierta donde se combinan la cobertura superior con un mayor o menor grado de protección lateral. En algunos casos, dicha protección lateral consiste en un paramento ciego a media altura, como en la Villa Romana de Materno. En otros está formado por un diseño de lamas horizontales capaces de controlar la incidencia solar directa, pero permitiendo iluminación natural y visibilidad del yacimiento, así como dotándolo de ventilación natural selectiva a través de él, como en el Dolmen de Dombate que, además, cuenta con muros pantalla en cimentación, paralelos al perímetro, que evitan la humedad provocada por capilaridad desde el terreno o por absorción de las escorrentías provocadas por la lluvia.

En el Yacimiento de Orce, el efecto de las lamas se combina con aberturas en cubierta que aumentan el control de los flujos de aire interior y de iluminación natural.

En estos casos, como se ha visto, la protección solar se presume de mayor efectividad, pudiendo ser controlada tanto en paramentos horizontales como verticales abiertos parcialmente. Existe en general un control de escorrentías mediante canalones y bajantes hacia el exterior del yacimiento o red de alcantarillado. En esta tipología, además de las labores de mantenimiento relativas a conservación estructural mencionadas en la tipología A, aparecen otras específicas de la envolvente vertical tales como protección contra corrosión de celosías metálicas, repintado de paramentos de fábrica o limpieza de vidrios.

c) Tipo C. Cobertura de tipo cerrado.

Por último, se detectan ejemplos con cerramiento completo del recinto a proteger. En estos casos el control de iluminación y ventilación, así como de condiciones higrométricas será determinante en las condiciones de estabilidad física de los elementos emergentes. Para el caso de los ejemplos analizados únicamente se aprecia un control, en mayor o menor medida, de las condiciones de iluminación, bien desde fachada con estudio de apertura de huecos en orientaciones de menor incidencia solar, como en la Villa Romana de La Olmeda o en la Villa Fortunatus, o bien desde cubierta, con proporción de huecos y control de transparencia de los lucernarios, como en la Villa Romana de La Tejada, no encontrándose la implementación de sistemas activos o pasivos de control de T^a, humedad relativa o niveles de CO₂ del ambiente interior. Sí es algo común la canalización de aguas de lluvia hacia el exterior de la edificación o red de alcantarillado, no suponiendo afección al yacimiento. En cuanto a las labores de mantenimiento, serán similares a las descritas en la tipología B, existiendo algunas adicionales como la sustitución de paños translúcidos de fachada, cuando estos constituyen en parte o la totalidad dicha envolvente.

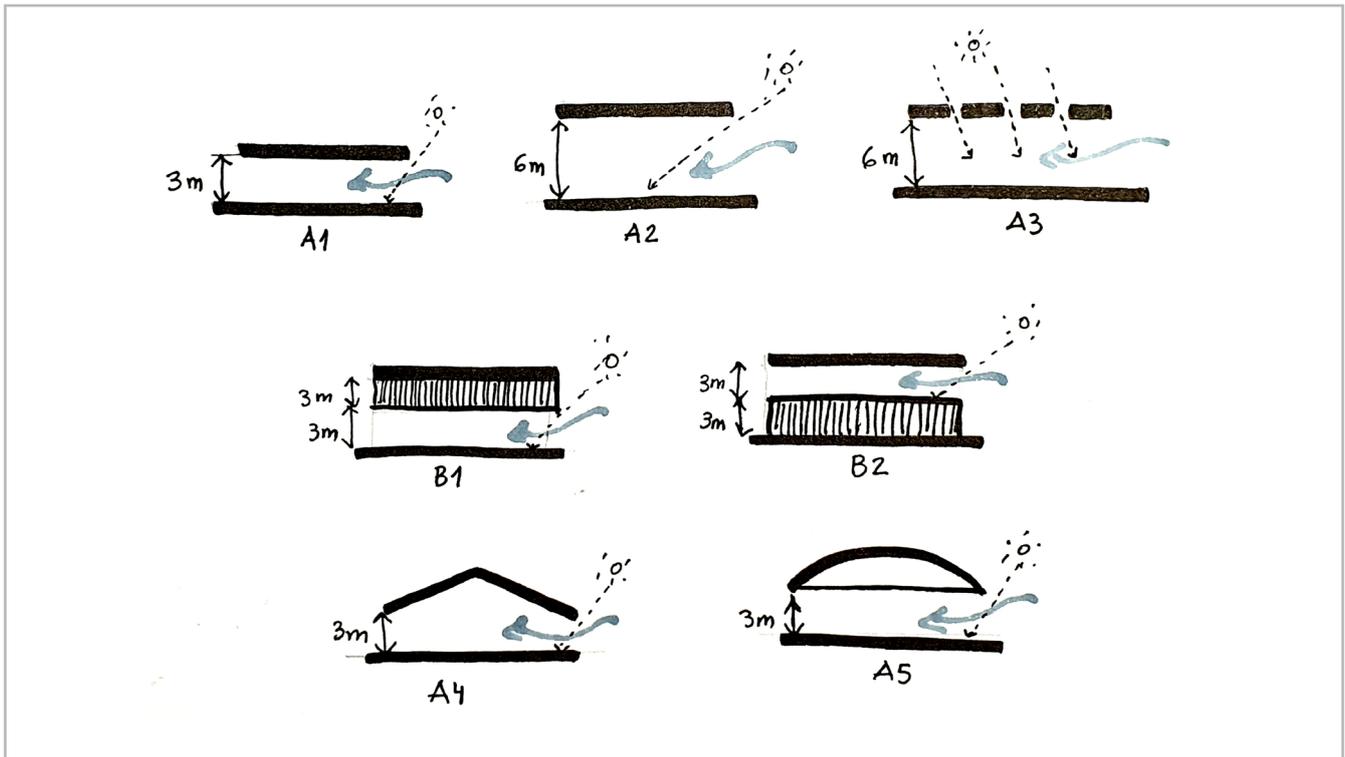


Figura 3.- Esquemas de Modelos seleccionados para su análisis.

Análisis del funcionamiento de cada tipo mediante software de control ambiental

Para realizar el análisis del comportamiento de los diferentes tipos en relación a la incidencia solar se extraen 7 modelos simplificados, representados en la Figura 3.

Se analizan casos de tipología abierta o semi-abierta, considerando que la opción completamente cerrada debe contar obligatoriamente con sistemas pasivos y activos de control de las condiciones del ambiente interior específicos para la conservación de los restos arqueológicos y el bienestar de los usuarios.

Del tipo A (abiertos), se proponen cinco subtipos:

- A1. Cubierta plana a una altura de 3,0 m.
- A2. Cubierta plana a una altura de 6,0 m, para comprobar la influencia de la altura en los parámetros analizados.
- A3. Cubierta plana a una altura de 6,0 m con lucernarios.
- A4. Cubierta a dos aguas, para comprobar la influencia del factor geométrico.
- A5. Cubierta con geometría cóncava o curva, para comprobar la influencia del factor geométrico como en el subtipo anterior.

Del tipo B (semi-abiertos), se proponen dos subtipos:

- B1. Cubierta plana a una altura de 6,0 m. con paramento vertical superior de 3,0 m cerrado e inferior abierto.
- B2. Cubierta plana a una altura de 6,0 m. con paramento vertical superior abierto e inferior de 3,0 m cerrado.

Para el análisis de la acción del viento, los modelos se reducen a cinco, eliminando los subtipos A2 y A3, que se asimilan al subtipo A1.

Para poder realizar la comparativa entre modelos, se establece una superficie arqueológica a cubrir de 20,0 x 18,0 m, similar al Cerro de la Merced de Cabra, orientando el lado largo perpendicular al eje Norte-Sur. Por otro lado, se ha establecido Sevilla como ubicación predeterminada en todos los casos, como localización representativa de zona climática B4 según documento del Código Técnico de la Edificación HE1, en clima mediterráneo.

a) Análisis de sombras y valores de radiación solar incidente global estacional, en el plano del yacimiento.

Una vez realizados los diferentes modelos en 3D mediante software CAD, se emplea la herramienta Autodesk Ecotect Analysis ©. Los datos climáticos empleados en el modelo se han extraído del archivo de extensión *.epw obtenido online del US Department of Energy, para la provincia de Sevilla, que se ha convertido en *.wea con la herramienta "weather tool" de Ecotect. Los valores exactos de posición geográfica son: Latitud: 39°, Longitud: -1.9°, msnm: 200,0 m. El porcentaje de sombra se ha evaluado en los solsticios de verano (22 Junio) e invierno (22 Diciembre), a las 10:00 h, 13:00 h y 17:00 h, respectivamente.

Para el cálculo de radiación solar incidente (directa + difusa + reflejada), se ha considerado el periodo de junio a septiembre como estacional estival, y el de diciembre a febrero como periodo estacional invernal.

Tipo	Porcentaje de sombra en yacimiento (%)	Radiación Incidente global estacional (KWh)	Incidencia Solar Directa
	Verano / Invierno	Verano / Invierno	
A1 Cubierta plana Altura = 3,0 m	10:00 h_ 80/25 13:00 h_ 95/50 17:00 h_ 80/25	43,67 / 21,54	La zona de mayor incidencia coincide con una banda perimetral de 2,0 m de ancho aproximadamente. En la zona interior la incidencia de la radiación solar es homogénea.
A2 Cubierta plana Altura > 6,0 m	10:00 h_ 60/0 13:00 h_ 85/30 17:00 h_ 60/0	82,71 / 46,05	La zona de mayor incidencia coincide con una banda perimetral de 3,5 m de ancho aproximadamente. En la zona interior la incidencia de la radiación solar es homogénea pero con niveles superiores al caso anterior, al estar la cubierta más separada de la cota del yacimiento.
B1 Cubierta plana Altura > 6,0 m Mitad inferior abierta / Mitad superior cerrada	10:00 h_ 80/25 13:00 h_ 95/50 17:00 h_ 80/25	80,41 / 42,73	La zona de mayor incidencia coincide con una banda perimetral de 2,0 m de ancho aproximadamente. En la zona interior la incidencia de la radiación solar es homogénea.
B2 Cubierta plana Altura > 6,0 m Mitad inferior cerrada / Mitad superior abierta	10:00 h_ 80/75 (banda) 13:00 h_ 90/60 (banda) 17:00 h_ 80/75 (banda)	49,67 / 21,58	El nivel máximo de incidencia disminuye respecto a los casos anteriores, pero es homogéneo en toda la superficie del yacimiento. El paramento aumenta la protección del perímetro, pero la zona abierta permite mayor recorrido de superficie de incidencia.
A3 Cubierta plana con lucernarios Altura > 6,0 m	10:00 h_ 60/0 13:00 h_ 75/20 (bandas) 17:00 h_ 60/0	96,99 / 52,02	La zona de mayor incidencia coincide con una banda perimetral de 3,5 m de ancho aproximadamente. En la zona interior la incidencia de la radiación solar aumenta al verse afectada por la presencia de los lucernarios.
A4 Cubierta a dos aguas Altura > 4,0 m	10:00 h_ 60/15 13:00 h_ 95/45 17:00 h_ 60/15	55,07 / 24,54	La zona de mayor incidencia coincide con una banda perimetral de 2,0 m de ancho aproximadamente en los lados de menor altura y de 3,5 m en los lados de mayor altura. En la zona interior la incidencia de la radiación solar es homogénea.
A5 Cubierta curva Altura > 4,0 m	10:00 h_ 70/15 13:00 h_ 90/45 17:00 h_ 70/15	49,83 / 21,97	La zona de mayor incidencia coincide con una banda perimetral de 2,0 m de ancho aproximadamente, con la forma ovalada de la cubierta. En la zona interior la incidencia de la radiación solar es homogénea.

Tabla 3.- Resultados de los análisis de sombras e iluminación solar directa de los modelos tipo seleccionados

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3 y en las Figuras 4 y 5.

b) Análisis de la acción del viento sobre la cubierta y el espacio bajo cubierta.

Una vez realizados los diferentes modelos en 3D mediante software CAD, se emplea la herramienta Autodesk Flow Design©. Se establece una velocidad del viento de cálculo de 100 km/h = 27,7 m/s.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4 y en la Figura 6.

Discusión de resultados

Según los resultados obtenidos se pone de manifiesto que:

- A pesar de la diversidad de soluciones detectadas en el inventario de cubiertas, se puede simplificar su clasificación en tres tipos fundamentales, atendiendo al grado de mayor o menor efectividad de protección del yacimiento: abiertas (A), semi-abiertas (B) o cerradas (C), siendo la primera opción la más numerosa.

- Todas las soluciones se ciñen al perímetro de la excavación, quedando desprotegido el mismo en las soluciones sin paramentos verticales.

- Ninguna de las soluciones de tipo cerrado ofrece aún un sistema de control adecuado de las condiciones interiores, mediante sistemas pasivos y/o activos. Solo en algunos casos se incorpora cierto aporte de iluminación natural mediante lucernarios o huecos transparentes o translúcidos en fachadas con mayor o menor control de radiación incidente.

- Del análisis comparativo de sombras se observa que, en todos los modelos, se produce una cobertura casi completa en las horas de mayor radiación solar (mediodía en verano), siendo sólo parcial (20-60% de cobertura) en periodo invernal en igual franja horaria. Por la mañana y por la tarde, sin embargo, las zonas laterales quedan parcial o totalmente desprotegidas tanto en verano como en invierno, alcanzando valores bajos de porcentaje de sombra (60% en subtipos A2, A3 y A4 en verano, o del 2% en subtipos A2 y A3 en invierno).

Como caso particular cabe destacar el comportamiento de la evolución de los porcentajes de cobertura del subtipo B2, para el cual se registran los menores valores de protección en las horas centrales del día en periodo invernal, aumentando hacia el amanecer y el ocaso, debido a la existencia de protección vertical parcial en la mitad inferior de la envolvente.

Analizando los mapas y gráfica de radiación solar global estacional, los modelos más eficientes desde el punto de vista de protección de incidencia solar son los subtipos A1, A4, A5 y B2, bien por su altura más ajustada general o perimetral o por la existencia de protección vertical en su mitad inferior. Por su parte, los subtipos A2, A3 y B1 presentan un grado de protección mucho menor, con valores de incidencia radiante global que, en general, duplican los valores anteriores en ambos periodos estacionales, debido a alturas de coberturas sobredimensionadas o a existencia de protecciones verticales ineficientes.

- El empleo incorrecto de materiales opacos en la envolvente implica la necesidad de contar con apoyo de iluminación artificial en las zonas centrales, sobre todo en yacimientos de grandes dimensiones, con el consecuente gasto económico y energético añadido. El uso de materiales textiles minimiza dicho apoyo gracias a sus propiedades reflectivas y de translucidez durante el día.

- Del análisis de viento en los modelos se deduce lo siguiente:

Subtipo A1: La velocidad del viento aumenta de 92,37 km/h a 160,02 km/h. Se trata de una opción óptima para facilitar la ventilación del área a proteger, aunque, unido a las precipitaciones, favorece que los restos se mojen. Los valores de succión y presión media son -40,00 kg/m² y 31,60 kg/m².

Subtipo B1: La velocidad del viento disminuye más de la mitad de 124,16 km/h a 71,17 km/h., generando turbulencias que provocan que el aire se embolse y ralentice bajo cubierta, si bien a ras de suelo, al no haber obstáculos, la ventilación es similar a los casos anteriores.

Los valores de succión y presión media son -25,00 kg/m² y 29,50 kg/m².

Subtipo B2: La velocidad del viento disminuye más de la mitad, de 124,88 km/h a 72,07 km/h. y se producen turbulencias que provocan que el aire se embolse y ralentice a ras de suelo.

Los valores de succión y presión media son -25,00 kg/m² y 50,00 kg/m²

Subtipo A4: La velocidad del viento disminuye más de la mitad de 140,83 km/h a 81,29 km/h. con un comportamiento similar al modelo B1.

Los valores de succión y presión media son -45,00 kg/m² y 33,00 kg/m².

Subtipo A5: La velocidad del viento disminuye más de la mitad, de 130,60 km/h a 75,38 km/h.

Los valores de succión y presión media son -50,00 kg/m² y 34,00 kg/m².

- Se puede evaluar cuáles son los modelos más favorables en función de las condiciones ambientales y su protección:

Los subtipos A1, B1, A4 y A5 son soluciones más adecuadas en ubicaciones con climatología cálida y seca, siempre que el perímetro de la cubierta sea mayor que la superficie necesaria a cubrir, para no someter a los objetos excavados a la acción de la radiación solar. En el caso de lugares de clima húmedo, precipitaciones persistentes, con veranos ligeramente más cálidos, no es una solución óptima. Igualmente sucede con el subtipo B2, pues el aire caliente sube y se expulsa al exterior. En este caso, el perímetro queda protegido tanto de la acción del sol como de la lluvia y puede ajustarse la superficie de cubierta a la del yacimiento. Sin embargo, la carencia de protección en la parte superior, no evita la exposición total a los agentes atmosféricos.

El subtipo A2 es más adecuado en lugares de clima húmedo, ya que permite la evaporación de la humedad más rápidamente en los meses de otoño-invierno y ofrece sombra en las horas punta del verano. En ubicaciones con climatología cálida y seca puede emplearse siempre que el perímetro de la cubierta sea superior a la superficie necesaria a cubrir.

El subtipo A3 es una solución más favorable en lugares de clima húmedo, ya que permite la evaporación de la humedad más rápidamente en los meses de otoño-invierno y ofrece sombra en las horas punta del verano. No es una opción recomendable en ubicaciones de clima seco y con altas temperaturas, ya que los lucernarios no protegen de

la radiación solar directa en las horas de más calor.

Para los tipos A será necesario atender a los anclajes a soportes teniendo en cuenta que son las soluciones que, por su forma, más succión de viento se produce en la cubierta.

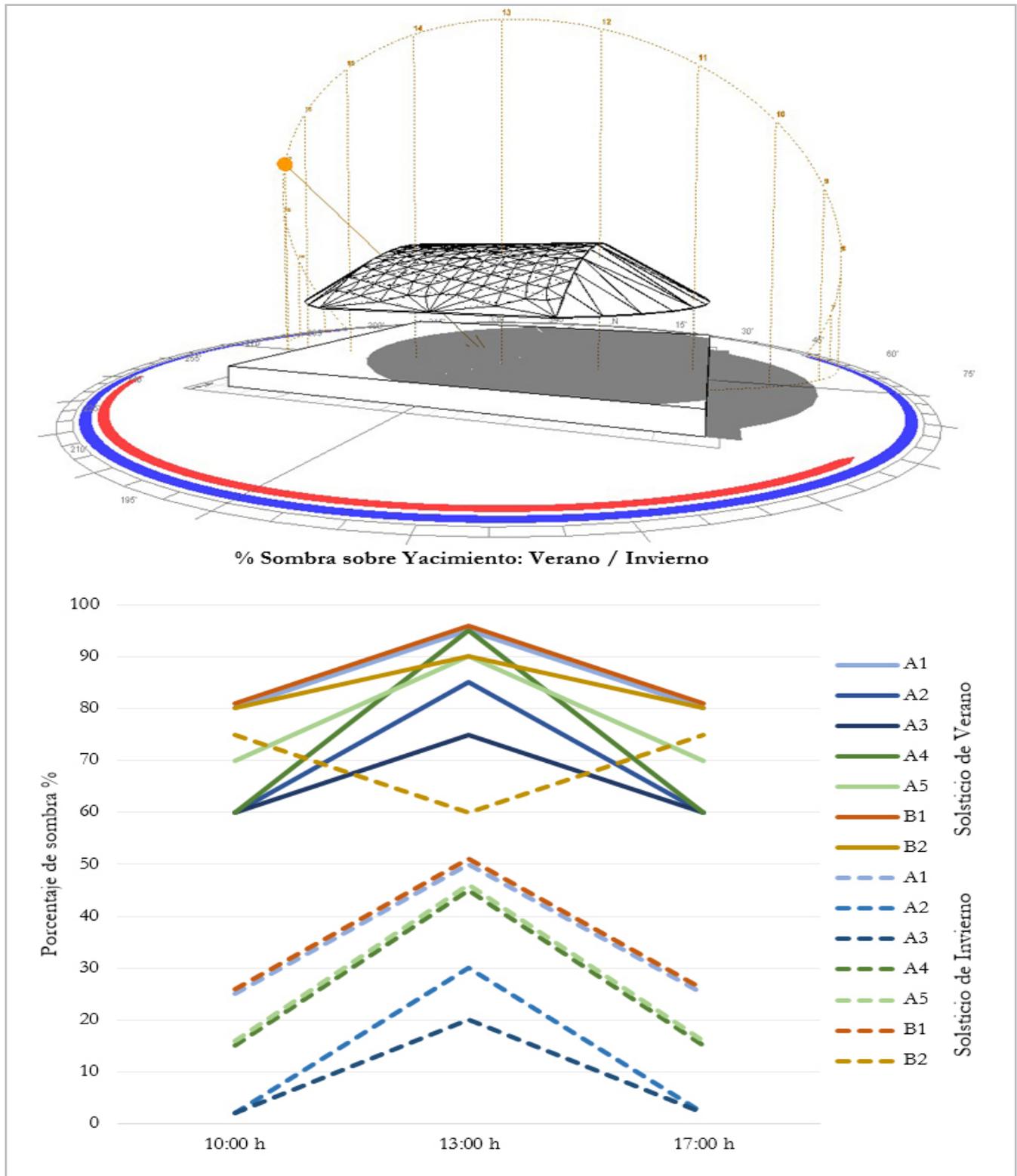


Figura 4.- Ejemplo de simulación de sombra arrojada y resultados obtenidos del Análisis de Porcentaje de Sombras sobre el yacimiento por tipología.

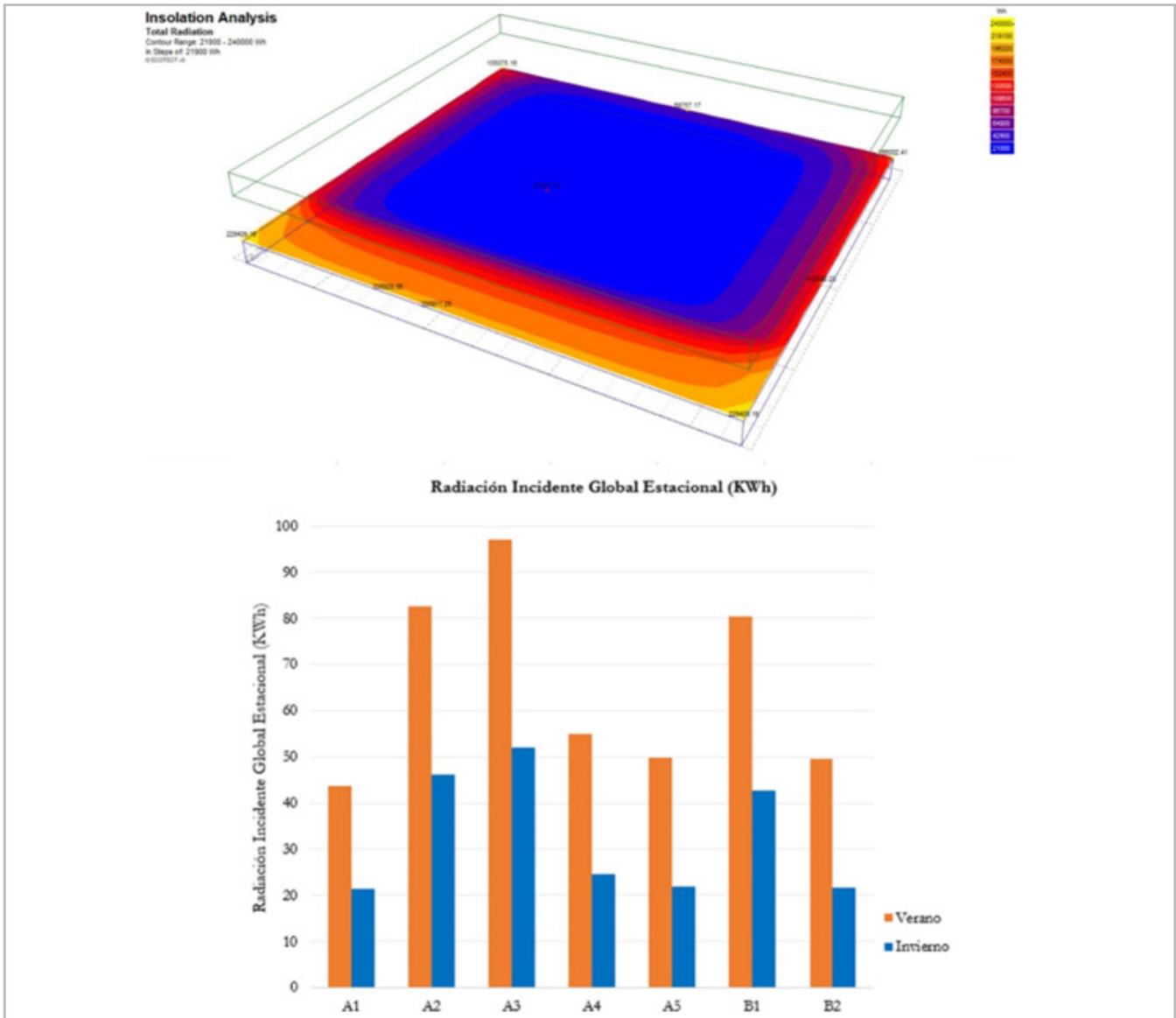


Figura 5.- Ejemplo de mapa de caso de estudio de incidencia solar y Resultados obtenidos del Análisis de Radiación Global Incidente Estacional (KWh) por tipología.

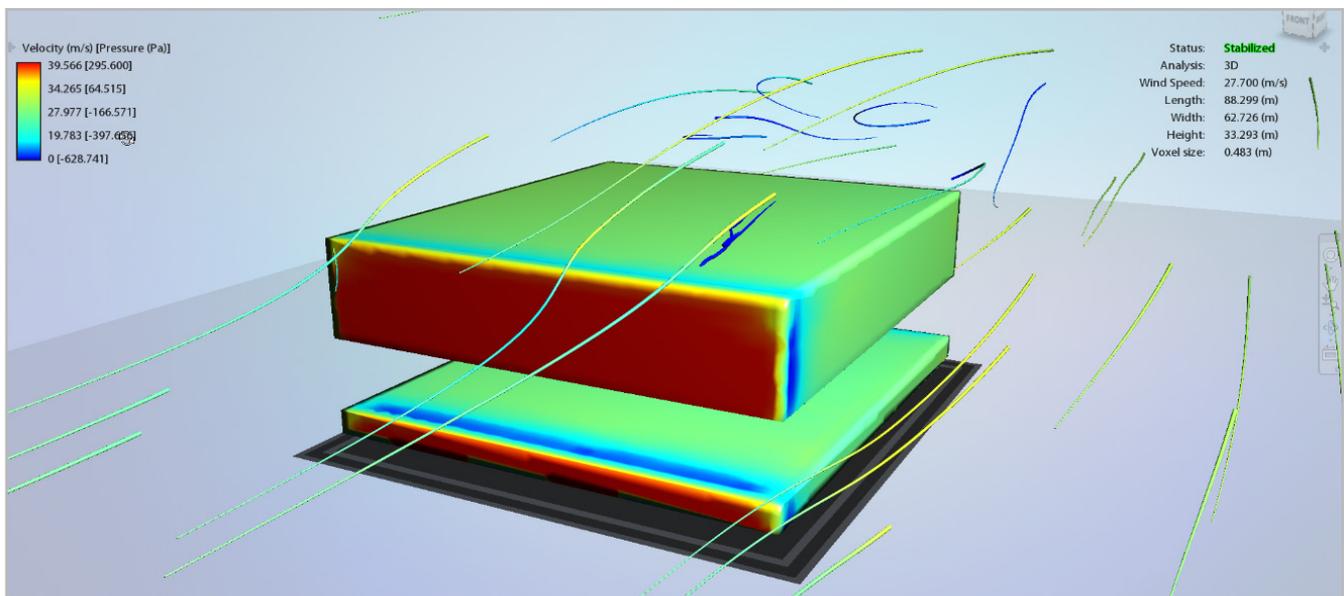


Figura 6.- Ejemplo de resultados gráficos obtenidos del Análisis de Acción del Viento.

Tipo	Velocidad inicial (km/h)	Velocidad final (km/h)	Succión Media en cubierta (kg/m ²)	Presión Media en paramento (kg/m ²)
A1_Cubierta plana Altura = 3,0 m	92,37	160,02	- 40,00	31,60
B1_Cubierta plana Altura > 6,0 m Mitad inferior abierta / Mitad superior cerrada	124,16	71,17	- 25,00	29,50
B2_Cubierta plana Altura > 6,0 m Mitad inferior cerrada / Mitad superior abierta	124,88	72,07	- 25,00	50,00
A4_Cubierta a dos aguas Altura > 4,0 m	140,83	81,29	- 45,00	33,00
A5_Cubierta curva Altura > 4,0 m	130,60	75,38	- 50,00	34,00

Tabla 4.- Resultados numéricos de la Acción del Viento de los modelos tipo seleccionados.

Conclusiones

Tras el desarrollo de la metodología propuesta y el análisis de los resultados obtenidos, se concluye lo siguiente:

- Se ha desarrollado una clasificación de coberturas de yacimientos arqueológicos a ras de suelo a modo de base datos, donde se muestra la diversidad geométrica y material de soluciones empleadas. La mayoría de los casos son soluciones únicas sin posibilidad de adaptación ni ampliación, ideadas únicamente como protección de sombra y con distinto grado en el control y canalización de las aguas pluviales hacia el exterior del yacimiento.

- La combinación de esta información con la base de datos gráfica, tanto de la solución real como del análisis esquemático de su comportamiento frente a acciones ambientales, posibilita la síntesis de los modelos y su clasificación tipológica atendiendo a su capacidad de protección.

- El análisis mediante software de control ambiental en relación a la incidencia solar directa y la acción del viento pone de manifiesto que ninguna de las tipologías existentes hasta ahora es efectiva para una conservación adecuada de yacimientos arqueológicos a ras de suelo que sea compatible, además, con labores de excavación y/o musealización. Los modelos clasificados como abiertos (A) o semi-abiertos (B) ofrecen soluciones a problemas puntuales como sombra en las horas de mayor temperatura en climas cálidos o ventilación en lugares con mayor presencia de humedad, pero aumentan las posibilidades de erosión, fisuras, degradación, aparición de eflorescencias, manchas, crecimientos vegetales, etc., que requerirá de labores de conservación frecuentes y/o costosas. Los modelos clasificados como cerrados (C) no ofrecen aún un sistema de control adecuado de las condiciones del interior, mediante sistemas pasivos y activos, que hagan compatible la conservación con el uso

del yacimiento, bien para labores de excavación o para su musealización, donde entran en juego otros factores como el número de visitantes, los recorridos, la posibilidad de acercamiento a los bienes materiales, el tiempo de apertura del recinto o el bienestar de los usuarios.

Parámetros de correcto diseño. Futuras líneas de investigación

Esta investigación pone de manifiesto la necesidad de desarrollar coberturas cerradas de yacimientos arqueológicos tanto para su protección como su puesta en valor, que sigan los parámetros siguientes:

- Empleo de arquitectura ligera y de rápido montaje.
- Diseño con capacidad de adaptación a contextos diversos, reversibles, de mínimo impacto medioambiental.
- Control de la evacuación de aguas pluviales.
- Control de las condiciones interiores del espacio cubierto mediante procedimientos pasivos que no requieran energía y/o activos en los que ésta pueda obtenerse mediante fuentes renovables.

En futuras publicaciones se mostrarán los resultados obtenidos a partir del diseño, construcción y monitorización de coberturas que siguen los parámetros expuestos.

Referencias

- AGNEW, N., MAEKAWA, S., COFFMAN, R. et. al. (1996). "Evaluation of the performance of a lightweight modular site shelter: Quantitative meteorological data and protective indices for the 'hexashelter'". In *Conservation and Management of Archaeological Site*, 1(3): 139-150. <https://doi.org/10.1179/135050396793137026>.
- ASLAN, Z. (1997). "Protective Structures for the Conservation and

- Presentation of Archaeological Sites", *Journal of Conservation and Museum Studies*, 3: 16–20. <http://doi.org/10.5334/jcms.3974>.
- BAGLIONI, R., CACACE, C., VALPUESTA, S. "Design and Evaluation of a Methodology of Study and an Environmental Management of a Cultural Property". En *VI Congreso GEIIC. ¿Y después? Control y mantenimiento del Patrimonio Cultural, una opción sostenible*, Vitoria-Gasteiz: Grupo Español del IIC (International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works), 198-205.
- BARKER, P. (1986). "Temporary shelter and site protection". In *Preventive measures during excavation and site protection: conference*, Ghent, 6-8 November 1985: ICCROM, 45-49.
- BERTAUX, J.P., GOUTAL, M., MECHLING, J.M. et. al. (1998). "The Gallo-Roman sanctuary at Grand, France. II: The protection and development of the amphitheatre", *Conservation and Management of Archaeological Sites*, 2 (4): 217-228.
- CABELLO BRIONES, C. (2017) "How to evaluate shelters for archaeological sites: some recommendations based on the use of exposure trials", *Ge-conservacion*, 11: 34-41. <https://doi.org/10.37558/gec.v11i10.442>.
- CABELLO BRIONES, 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.
- CABELLO BRIONES, C., (2020) "Comparative Performance Evaluation of the Shelters at Complutum, a Roman Archaeological Site in Spain", *Conservation and Management of Archaeological Sites*, 22 (1-2): 38-51. <https://doi.org/10.1080/13505033.2021.1893949>.
- CABELLO BRIONES, C. (2020) "The performance of shelters for the conservation of archaeological sites in dry and warm climates: the case of Complutum", *Ge-conservacion*, 17 (1): 193-201. <https://doi.org/10.37558/gec.v17i1.756>.
- CABELLO BRIONES, C., PRIETO, A.J., ORTIZ, P. (2021) "Determination of the technical suitability of shelters for archaeological sites using fuzzy logic", *Journal of Cultural Heritage*, 48: 211-226. <https://doi.org/10.37558/gec.v17i1.75610.1016/j.culher.2020.11.006>.
- CORTES, J. (1989). "Sistemas de cobertura de mosaicos conservados in situ". En *I coloquio nacional de conservacion de mosaicos*, Palencia: Diputación Provincial, Departamento de Cultura, 143-149.
- CURTEIS, T. (2018). The use of environmental survey and monitoring in the design and evaluation of archaeological shelters 40 Tobit Curteis. In *Protective Shelters for Archaeological Sites: proceedings of a symposium*, Herculaneum: British School at Rome, 40-49.
- DÍAZ, S. (2005). "La Conservación de los Yacimientos Arqueológicos In Situ". *Boletín Arkeolan*, 13: 110-130.
- GERMANÀ, M.L. (2013). "Archaeological construction and its relationship with place: the theme of shelters". In *Urban Archaeology Enhancement*. Pisa: ETS Pisa, 183-210.
- GILES, F., BOUZAS, A., PINTO, V. (2003). AA.VV. *Publicación del Taller de Conservación Preventiva en Excavaciones Arqueológicas in Situ*, Cádiz. Sevilla: Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico, Colegio Oficial de Doctores y Licenciados en Filosofía y Letras de Cádiz.
- GIACHENTTI, M. (1994). "Dei Mosaici e Aree Archeologiche: Problema di Competenze e non di Metodología". In *Fifth conference of the international committee for the conservation of mosaics*, Faro e Conimbriga: ICCM, 145-150.
- MARTIARENA, J. (1992). "Conservación y Restauración", *Cuadernos de Sección. Artes Plásticas y Documentales*, 10: 177-224.
- PANOSKALTIS, V., VANTA-VASILKI, K. (2019). "Shelters for Monuments: Contribution to Sustainable Management and Future Heritage Preservation". In *ASHRAE EinB2019*, Athens: Energy in Buildings.
- ORDÓÑEZ MARTÍN, M., GÓMEZ DE CÓZAR, 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>.
- ROBY, T., DEMAS, M. (2012). *Mosaics in situ: an overview of the literature on conservation of mosaics in situ*. Los Angeles: Getty Conservation Institute.
- RODRÍGUEZ TEMIÑO, I. (2014). *Investigar, conservar, difundir. El Proyecto Guiraldas en el Conjunto Arqueológico de Carmona*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- SBROGIO, L., BASSO, A., BORIN, P. et. al. (2021). "Design Criteria and Procedures for Archaeological Shelters: Towards Flexibility Thanks To Algorithmic Modelling". In *12 th International Conference on Structural Analysis os Historical Constructions, Online event*: International Centre for Numerical Methods in Engineering, 1547-1558.
- SCHMIDT, H. (1988). *Schutzbauten*. Stuttgart: Konrad Theiss Verlag.
- SPOSITO, C., RUGGIERI TRICOLI, M. (2004). *I Siti Archeologici:dalla Definizione del Valore alla Protezione della Materia*. Palermo: Dario Flaccovio Editore.
- STANLEY PRICE, N. (1984). *La Conservación en Excavaciones Arqueológicas*. Roma: ICCROM.
- THEOULAKIS, P. (1993). "Microclimatic monitoring at the temple of Apollo Epikourios at Bassai, Greece". En *Conservation of Stone and Other Materials*, 2. London: E. and F.N. Spon, 808-813.

Autor/es**Manuel Ordóñez Martín**

maormarq@us.es

Universidad de Sevilla. E.T.S

<https://orcid.org/0000-0002-3068-0882>

Arquitecto en ejercicio libre de la profesión desde 2001, y Máster en Arquitectura y Patrimonio Histórico en 2012. Actualmente es Profesor Asociado de la Universidad de Sevilla, Profesor Máster en Proyecto de Instalaciones en Arquitectura (2011- 2021) en el Departamento de Construcciones Arquitectónicas 1. Pertenece al Grupo de Investigación TEP 130. Doctorando con tesis en redacción: Análisis y Desarrollo de Coberturas Temporales Eficientes en Yacimientos Arqueológicos. Tiene varias publicaciones, se puede consultar su producción científica en: https://investigacion.us.es/sisius/sis_showpub.php?idpers=7429

Artículo enviado 23/02/2022
Artículo aceptado el 07/11/2022



<https://doi.org/10.37558/gec.v22i1.1097>

**Juan Carlos Gómez de Cózar**

gcozar@us.es

Universidad de Sevilla. E.T.S

<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

<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). Tiene varias publicaciones, se puede consultar su producción científica en: www.linkedin.com/in/rosamariabenitezbodes