

## Interpret the darkness: caves, rock art and analysis of simulated light through virtual scenes

## Interpretar la oscuridad: cuevas, arte rupestre y análisis de luz simulada mediante escenas virtuales

Camilo Barcia García<sup>1</sup>, Alfredo M. Maximiano Castillejo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Cantabria <sup>2</sup>IIPC, Universidad de Cantabria

---

### **Resumen**

*Los avances de la tecnología digital han aumentado la capacidad de capturar, procesar y analizar datos espaciales, facilitando reproducciones realistas y precisas de los elementos que forman los espacios arqueológicos. Hardware y software actuales poseen un gran potencial para modelizar fenómenos y simular sus parámetros, aportando los medios para resolver problemas arqueológicos que hasta fechas recientes eran difícilmente abordables (técnicas intrusivas, riesgos para el patrimonio, lugares recónditos, obstáculos insalvables, etc.). Así, para aproximarnos a implicaciones de tipo contextual, proponemos la simulación de luz en sitios afóticos como base desde la que tratar relaciones espaciales entre agentes sociales y elementos. En este trabajo relacionamos la intensidad de luz necesaria, su propagación en el espacio, y las restricciones derivadas para la realización de actividades, especialmente en la producción y el consumo visual de arte rupestre.*

**Palabras Clave:** ESCENA VIRTUAL, SIMULACIÓN, ILUMINACIÓN, ANÁLISIS ESPACIAL, ARTE RUPESTRE.

---

### **Abstract:**

*Advances in digital technology have raised the capacity of capturing, processing and analyzing spatial data, bringing realistic and accurate reproductions of the elements in archaeological spaces. Current hardware and software have great potential in modelling phenomena and simulating their parameters, leading effective resources to these archaeological issues that have been hard to tackle until recent dates (intrusive techniques, heritage risk, hidden places, unavoidable impediments...). Thus, to approach contextual implications, we propose lighting simulation in aphotic sites as a procedure to study spatial relations between social agents and elements. In this paper we relate the necessary light intensity, its spatial distribution, and any derived implications for activity performing, especially in rock art production and visualization.*

**Key words:** VIRTUAL SCENE, SIMULATION, LIGHTING, SPATIAL ANALYSIS, ROCK ART.

---

### **1. INTRODUCCIÓN**

En el marco de la arqueología espacial existe un conjunto heterogéneo de prácticas y planteamientos orientados a extraer información social de las relaciones espaciales. Esta praxis abarca desde la geolocalización de las evidencias

arqueológicas hasta su análisis pormenorizado, lo que deviene en un discurso interpretativo sobre por qué aquellas *están allí* y *de ese modo*. Así pues, el estudio de los *espacios arqueológicos* es eminentemente contextual y holístico, implicando *per se* relaciones complejas entre

variables que deben superar la parcialidad inherente del registro arqueológico.

Habitualmente nos hallamos ante análisis reservados únicamente a la ubicación de las consecuencias materiales que se derivan directamente de las acciones (estructuras, útiles, etc.), los cuales no suelen contar con las implicaciones que impone el entorno donde se realizaron. Este entorno, que aquí nombramos *ambiente*, en ocasiones limita o condiciona físicamente las circunstancias en que las actividades fueron realizadas, afectando con ello las relaciones contextuales entre los efectos materiales así como a la localización de dichas actividades.

Así, el ambiente deviene en una variable relevante en la medida que el cuerpo humano se ve afectado fisiológicamente por las circunstancias que aquél impone, lo que confiere a las actividades una connotación determinada. La percepción humana del entorno se sostiene en los órganos sensoriales, siendo sus fundamentos biológicos los que aportan información sobre lo que puede o no ser percibido y en qué grado. En este sentido, la percepción espacial en arqueología ha sido abordada principalmente a través de los estudios de visibilidad, los cuales han tratado de explicar la intención social que condujo a que unas cosas fueran vistas desde ciertos lugares y otras no (Frieman y Gillings, 2007). En parte, esto se orientó a complementar aquellas interpretaciones de los *espacios sociales* que articulaban la percepción individual con una lógica de comportamiento colectivo, sirviendo de apoyo a los planteamientos sobre la construcción social del *paisaje* y el *lugar*. Si bien esto ha producido una abundante literatura, especialmente en el *Landscape*, el rol que aquí adopta la percepción visual es otro: *¿es posible relacionar espacialmente las evidencias materiales a partir de limitaciones fisiológicas sensoriales?*

En el presente trabajo argumentamos que la dependencia que se establece entre la capacidad visual e iluminación artificial en ambientes *afóticos* (sin luz natural, máxima oscuridad) condiciona la percepción y, por tanto, las acciones realizadas en tales circunstancias. En

este caso, identificamos la relación entre el arte rupestre y el contexto ambiental en que éste fue producido y visualizado, estableciendo como nexo principal de esa relación a la iluminación artificial. Lejos de proponer una explicación sobre la “percepción del lugar” y su simbolismo, proponemos una aproximación cuantitativa que delimite espacialmente el alcance de la interacción entre arte y agentes sociales. Pretendemos, pues, aportar inferencias que ayuden a caracterizar diferencialmente cómo pudo haber sido el contexto de producción de otro de consumo (visualización) en el arte rupestre a través de la concurrencia de la variable ambiental “iluminación artificial”. Así, la percepción visual humana, la luz artificialmente generada y las constricciones espaciales impuestas por las propiedades físicas de la luz son factores que condicionan esos dos contextos.

Para el contraste de hipótesis nos valemos del desarrollo de técnicas geomáticas para la captura y procesamiento de datos espaciales (Fritz y Tosello, 2007; McCoy y Ladefoged, 2009; Stal et al., 2014), la visualización analítica (Frischer y Dakouri-Hild, 2008; Llobera, 2011) y la creación de entornos de Realidad Virtual (Forte, 2011), los que nos permite reformular problemas que hasta hace poco eran difícilmente abordables a través de entornos de solución empíricamente contrastables.

En lo que nos ocupa, desde inicios de los años 2000 han surgido varios trabajos relacionados con la iluminación y la percepción visual del entorno. Se han orientado a evaluar las restricciones provocadas por la ausencia de luz, los efectos visuales producidos por la iluminación artificial, la relación con el diseño arquitectónico y su intencionalidad, la puesta en valor del patrimonio, etc. (Happa et al., 2010). Ante la parcialidad del registro arqueológico, muchos de estos casos optan por reconstruir virtualmente escenarios en los que simular los fenómenos que allí tuvieron lugar (Dawson et al., 2007; Devlin et al., 2002; Gutiérrez et al., 2008; Masuda et al., 2006; Ortega, 2014; Papadopoulos y Earl, 2014, entre otros). Esto abre nuevas expectativas en el estudio de las

relaciones espaciales que no serían accesibles solamente desde la óptica clásica de las distribuciones de evidencias en suelos de ocupación.

## 2. OBJETIVOS

Mientras la historiografía del arte rupestre se ha centrado principalmente en el estudio de la figuración, sus pigmentos, su cronología, su dispersión geográfica y su significado, aquí proponemos un análisis que tenga a la luz como elemento transversal. El análisis que desarrollamos parte del marco teórico sugerido por Pastoors y Weniger (2011) para el análisis espacial-contextual del arte inmueble, así como de los trabajos de Dawson et al. (2007) y Papadopoulos y Earl (2014) en materia de visualización analítica de la luz en determinados contextos.

Nuestra propuesta se sustenta en una premisa biológica: el ojo humano no es capaz de percibir su entorno si sobre él no inciden unos niveles mínimos de luz, es decir, a partir de cierto umbral el órgano visual es insensible. Sin embargo existen numerosos casos en los que manifestaciones de arte rupestre (pinturas, grabados, “*façonage*” de elementos geológicos, etc.) se localizan en el interior de cavidades, en lugares inaccesibles para la luz solar. El carácter artístico-representativo y la ubicación en que son halladas les confiere una intención social eminentemente simbólica (Arias, 2009). En tales circunstancias, tanto para acceder y transitar por cuevas y galerías (ambientes afóticos), como para producir y visualizar las expresiones artísticas hubo de emplearse algún dispositivo de iluminación artificial. Así, en el Paleolítico Superior no fue posible proporcionar una iluminación homogénea ni que cubriera la totalidad del espacio existente, solamente podría *suprimirse* la oscuridad de una extensión finita. De este modo, el emplazamiento de una fuente de luz en una ubicación iluminaría la región espacial circundante según un gradiente, con mayor intensidad en el área más cercana a la fuente y disipándose a medida que aumenta la distancia desde ésta. La problemática que

abordamos se basa en que, en estos escenarios, cuando un agente ilumina un lugar está necesariamente oscureciendo otro, lo que repercute en una división espacial del entorno y en la iluminación de las superficies próximas (relieve de las paredes). Así, por efecto de la proximidad o lejanía de la fuente de luz, se crea un espacio iluminado *contrapuesto* a un espacio oscuro: un espacio útil y activo frente a otro inactivo (siempre en relación a actividades que requieran de luz). Es decir, elegir *qué* iluminar depende de las necesidades de cada momento, ya sean materiales (habilidad para realizar acciones) o comunicativas (mensaje transmitido por mediación de una representación artística).

La luz puede definirse espacialmente como una variable continua que posee una variabilidad en sus valores de iluminación e incidencia que dependerá de la localización e intensidad del foco emisor, del relieve y las características del área (rugosidades, espacios abiertos o cerrados, etc.), así como de la superficie iluminada, reflectancia y reacción del pigmento ante el flujo de luz recibido. De acuerdo a parámetros físicos (radiométricos) y leyes universales que describen su comportamiento, la variable lumínica puede simularse realísticamente mediante software especializado, generando con ello escenas virtuales que reproduzcan la fracción de la realidad sobre la que realizamos el estudio. En nuestro estudio, la distancia entre fuente de luz y superficie iluminada es el factor fundamental del que dependerá la extensión que tendrá el espacio iluminado, condicionando con ello las relaciones espaciales entre uno o varios agentes y la figuración artística.

¿Cuánta luz es necesaria, como mínimo, para poder contemplar las representaciones? ¿Dónde debe posicionarse la fuente emisora, a qué distancia de su objetivo? ¿Fue posible manipular libremente estas variables durante el Paleolítico Superior o la tecnología y la logística disponibles limitaban las posibilidades? Estas y otras preguntas pueden responderse siempre que se orienten a obtener información contrastable, articulando la formalización de las variables con la búsqueda de unos supuestos mínimos. En otras palabras, si incluyéramos todas las

combinaciones posibles de todas las localizaciones factibles obtendríamos un sinnúmero de soluciones verosímiles de acuerdo a esos parámetros. La incertidumbre inicial sobre las soluciones posibles es un factor que debemos gestionar centrándonos en los *grados de libertad* que permite o impide la intersección de las siguientes variables:

- capacidad lumínica de los dispositivos paleolíticos,
- cantidad de luz necesaria para que la percepción visual pueda discernir formas y colores,
- distanciamiento máximo entre la superficie iluminada y la fuente emisora sin que se sobrepasen los mínimos requeridos para la percepción visual del entorno.

Así, entendemos “grados de libertad” como una medida de la diversidad de gestos y localizaciones espaciales en que puede ubicarse una fuente de luz durante la *acción de iluminar* sin que la percepción visual que se pretendía obtener se vea significativamente mermada (en relación a la capacidad del ojo humano y la intencionalidad).

En este trabajo realizaremos una tarea exploratoria para comprobar cómo las tres variables anteriores se complementan, habilitando o inhibiendo la libertad de que disponían uno o varios agentes en el momento de interactuar con el arte rupestre. Y de ello obtendremos la posibilidad de inferir aspectos sobre su producción y visualización a través de la dimensión espacial. Esta aproximación a la iluminación la realizaremos a través de un único dispositivo, las lámparas de grasa, de las cuales existe un amplio registro en Francia y la Península Ibérica. De este modo resolvemos la siguiente pregunta: ¿dada que la iluminación debió ser necesaria, qué implicaciones espaciales pudo tener el uso de lámparas para las tareas de producción y visualización artística?

### 3. METODOLOGÍA Y CASOS DE ESTUDIO

Tal como se ha sugerido más arriba, nos encontramos ante una situación doblemente compleja: por un lado, no conocemos el significado *per se* del arte, el grado de sincronía entre las distintas creaciones ni cuántos agentes sociales participaban de la dinámica de producción/visualización (Fig. 1). Por otro, existe un factor de incertidumbre sobre el número de fuentes de luz que pudieron usarse y su localización (fijas/móviles, intensidad...). De este modo las soluciones posibles acerca de la forma de iluminar deben sustentarse en un conjunto amplio y flexible de posibilidades que sean empíricamente contrastables, que nos sirvan para alcanzar explicación de la fenomenología estudiada.

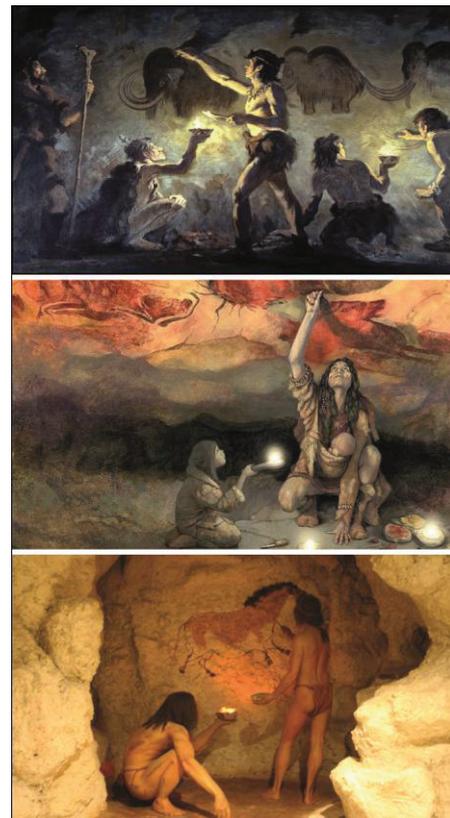


Fig. 1 – *Recreaciones ideales del proceso de producción artística y su visualización: versiones de Ch. R. Knight en 1922 (arriba), de A. Asensio (medio) y del Smithsonian Museum of Natural History (abajo).*

Desde un enfoque epistemológico, la *Soft-Computing* es un entorno flexible desde el que abordar y resolver problemas gestionando la incertidumbre propia del objeto de estudio para ofrecer soluciones versátiles, robustas y expeditivas. Es decir, ante la imposibilidad de alcanzar un resultado lineal y preciso (optimización y *Hard-Computing*), esta perspectiva aprovecha la tolerancia inherente a la formulación de un problema no lineal para ofrecer soluciones operativas y coherentes a partir de unos fundamentos mínimos (Li et al., 1998; Verdegay et al., 2008). Las ideas subyacentes en este modo de afrontar una problemática nos sirven de inspiración: no buscamos conocer la cantidad de lámparas que hubo ni su posición exacta en cada caso, ni tampoco el número de personas que intervinieron en la producción y/o visualización; sino observar y describir cuántos grados de libertad permiten las lámparas en los contextos señalados, y qué implicaciones espaciales se derivan en relación a la producción y consumo de arte rupestre.

### 3.1. El comportamiento de la luz: algunos parámetros

Hoy día, la simulación de luces forma parte del diseño y la evaluación de espacios, por lo que la luminotecnia posee un relieve significativo en cualquier proyecto arquitectónico, artístico o de ingeniería. Su aplicación en arqueología aún es emergente (Happa et al., 2010). Los conceptos y relaciones sintetizados en la Fig. 2 reflejan cómo es el comportamiento de la luz en el plano físico, su propagación y los elementos que condicionan la percepción humana. En resumen, a la hora de simular debemos atender a la *intensidad*  $I$  con que una fuente emite energía lumínica (unidad de medida SMI: candela, cd), cómo la luz se extiende por una superficie receptora (*iluminancia*  $E$ , SMI: lux) y qué cantidad de luz rebota (siendo re-emitada por) esa superficie y permite al ojo humano percibir formas y colores (*luminancia*  $L$ , SMI:  $\text{cd}/\text{m}^2$ ). Los parámetros que condicionan la luminancia son determinados por las propiedades materiales de la superficie receptora y se dividen en *reflectancia*, *transmitancia*

y *absorción*. De igual modo, todos estos parámetros quedan interrelacionados por cuatro leyes universales básicas: *Ley de adición* (suma lineal del producto de dos o más emisiones), *Ley de la inversa del cuadrado de la distancia* (la distancia respecto a la fuente diluye su potencia de manera exponencial), *Ley del coseno* y *Ley del coseno cúbico* (rebote y transmisión de luz según el ángulo de incidencia) (Jacobs, 2004; Schubert, 2006; Taylor, 2000).

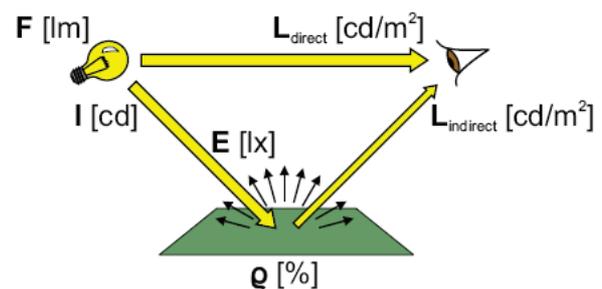


Fig. 2 – Esquema de A. Jacobs (2004).

La simulación de escenas la hemos basado en el renderizado de imágenes, donde cada píxel es el output de una serie de cálculos que relacionan las emisiones de todas las fuentes de luz, el ángulo de incidencia de  $F$  sobre una superficie, la distancia que separa la fuente de la superficie iluminada, etc.

### 3.2. Luces del Paleolítico: premisas y metodología

Este estudio se centra en el arte rupestre del Paleolítico Superior, período en el que se han hallado múltiples medios de iluminación: *lámparas, hogares, antorchas...* (Beaune, 2000). En este trabajo nos centramos en las lámparas de grasa, las cuales cuentan a su vez con cierta catalogación y estudio, incluyendo análisis experimentales (Beaune, 1987a, 1987b; 2003; Beaune y White, 1993); asimismo, se tiene constancia del uso de estos instrumentos en varios sitios de la península (Fig. 3) (Medina et al., 2012; Rasilla et al., 2010; Sánchez, 2013).

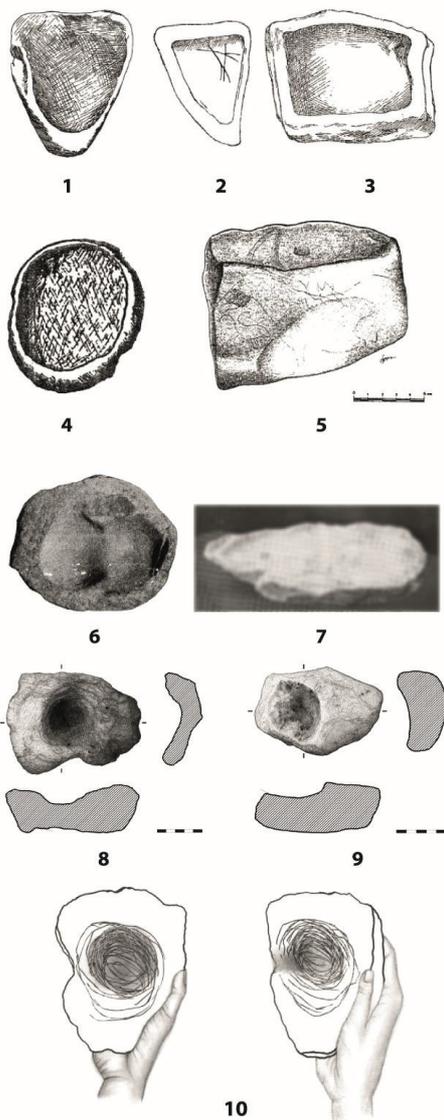


Fig. 3 – Ejemplos de lámparas del norte peninsular: 1) Ermitia, 2-3) Santimamiñe, 4) Bolinkoba, 5) Abautz, 6) El Juyo, 7) El Pendo, 8) Llonín, 9) El Covarón, 10) reconstrucción orientativa de la prensión (imágenes extraídas de Rasilla et al., 2010).

En la mayor parte de los casos el combustible fue grasa o tuétano animal, generando una intensidad de llama entre 0,3 y 1 cd de un color cálido entre 2.200 y 2.400 K (sistema de color CCT) (Beaune, 1987a). No obstante, el factor más importante para nosotros es la percepción visual, la cual aporta una medida de lo que puede ser visto o no. Los *conos* y los *bastones* son las células fotosensibles del ojo encargadas de recibir y procesar las diferentes intensidades de

luz ambiental, actuando las primeras ante una buena iluminación ( $E > 10$  lx y  $L > 3$  cd/m<sup>2</sup>) y las segundas ante la escasez de luz ( $E < 0,01$  lx y  $L < 0,003$  cd/m<sup>2</sup>). Aunque la sensibilidad ocular responde a los estímulos externos y aumenta ante condiciones de iluminación adversa, manteniendo su operatividad, la calidad visual se ve reducida drásticamente a una visión monocromática. Se distinguen, así, los estadios de visión fotópica y escotópica respectivamente. La combinación de ambos tipos de células se produce en situaciones de penumbra (estadio mesópico: rango de 0,01 a 10 lx y de 0,003 a 3 cd/m<sup>2</sup> aprox.), permitiendo todavía distinción de colores pero con menor nitidez que en la visión fotópica (Colombo y O'Donnell, 2006; Ishida, 2002; Jacobs, 2004; Middleton y Mayo, 1952; Schubert, 2006: 275-291; Shin et al., 2004). La percepción del arte rupestre se basa, en última instancia, en el contraste entre el color de la figuración (sus matices y detalles) y el color del soporte sobre el que es plasmado; en lo que también se incluyen los grabados, ya que el ángulo de incidencia de la luz marca la distinción del relieve a distancia respecto al resto de pared (Pastoors y Weniger, 2011). En este trabajo asumimos, como medida orientativa, que las representaciones artísticas requieren de un sistema de iluminación capaz de aportar, al menos, una  $E = 2$  lx y de generar una  $L = 1$  cd/m<sup>2</sup> para contar, dentro de una visión mesópica, con un mínimo grado de visibilidad.

En una primera fase de estudio, nos hemos aproximado a la iluminación artificial experimentalmente, aplicando la metodología a un caso de estudio ajeno al arte rupestre (Maximiano y Barcia, 2014). Con ello hemos calibrado expectativas y límites, obteniendo una serie de modelos en los que la simulación de parámetros lumínicos nos ha permitido entender a grandes rasgos la propagación de la luz en el espacio. Así pues, hemos simulado diferentes combinaciones entre cantidad de fuentes emisoras, intensidades y distancias, obteniendo varias soluciones posibles que describen el comportamiento lumínico y alcanzando algunas implicaciones. Para esto hemos generado una reconstrucción 3D de un pequeño abrigo cárstico de fácil acceso y arqueológicamente

estéril, pero que reproduce algunas características de los casos arqueológicos (zonas lisas, grietas, relieves que pueden dar volumen a las pinturas...). En una segunda fase hemos trabajado sobre un caso arqueológico: dos paneles ubicados en la Galería Inferior de La Garma (Omoño, Cantabria) (Maximiano et al., en prensa). Esta cavidad cárstica fue ocupada durante el Paleolítico Superior cuyo acceso principal quedó sellado tras el colapso estructural de la apertura, impidiendo todo proceso de sedimentación y reduciendo las alteraciones tafonómicas (Arias et al., 2001; Ontañón, 2003). En este sitio se han conservado multitud de evidencias arqueológicas, entre las cuales existe una cantidad significativa de muestras de arte parietal de diferentes cronologías. Los conjuntos que aquí tratamos son dos: un panel con figuración zoomorfa sobre una pared con fisonomía abierta, sin elementos reflectantes cercanos (Zona IV del sitio, cercano a suelos de ocupación); y otro con representación de manos en un espacio cerrado, donde la cavidad y las paredes cercanas ejercen de reflectantes (Zona IX) (Fig. 4).



Fig. 4 – Casos de estudio. Figuración zoomorfa de Zona IV (izquierda), panel con manos de Zona IX (derecha). Extensión de los paneles analizados en rojo, paneles adyacentes en verde.

En este caso contamos con un modelo digital completo de la Galería Inferior realizado con láser escáner, mientras que en el caso experimental hemos aplicado fotogrametría. De cualquier modo ambos se insertan del mismo modo en el flujo de trabajo implementado (Fig. 5):

- 1) captura de geodatos,
- 2) reconstrucción virtual y evaluación del modelo,
- 3) simulación y renderizado de escenas.

En la captura, destinada a la reconstrucción virtual del abrigo, hemos escogido la fotogrametría por las ventajas que comporta. A diferencia de los actuales sistemas láser-escáner y de estación-total, el SFM (*structure from motion*) se ha convertido en un proceso de alta calidad, rápido y preciso, capaz de controlar las desviaciones y errores. A su vez, es económico y relativamente sencillo de usar para recomponer gran variedad de objetos y superficies a escala a partir de series fotográficas, permitiendo exportar fácilmente el resultado con su textura original a programas de análisis y edición 3D. Actualmente la fotogrametría cuenta con una aplicabilidad arqueológica suficientemente madura, tanto en trabajos de excavación como en la documentación de cuevas y arte rupestre (Cabrelles y Lerma, 2013; Lerma et al., 2010, 2013; Stal et al. 2014). Así pues, consideramos que la fotogrametría es un recurso óptimo para tratar la problemática propuesta, ya que permite enfrentar la dimensión espacial de este caso de una forma global al digitalizar el objeto de estudio en su totalidad (morfología y texturas) y con la precisión suficiente (Domingo et al., 2013). En la obtención del modelo se ha empleado el software *Agisoft Photoscan (v.1.0.4)*, por un lado, y *MeshLab (v.1.3.3)* y *Blender (v.2.71)* por otro para gestionar datos y corregir posibles distorsiones iniciales tanto del caso experimental como del arqueológico. Tras generar el modelo, hemos simulado paramétricamente la iluminación en un ambiente de oscuridad total ubicando fuentes emisoras de diversa intensidad en distintas posiciones, valiéndonos del programa *3ds Studio Max 2013* de *Autodesk* (motor render: *Mental Ray*). Para evitar una

difusión isotrópica de la luz hemos optado por crear un pequeño plano de 4 x 4 cm bajo la fuente de emisión; esta arbitrariedad se debe a que el  $F$  de las lámparas no es emitido esféricamente, sino que el propio dispositivo y el agente que lo sostuvo dificultan o impiden que éste alcance cotas más bajas que la lámpara y lugares que estén detrás del propio agente (Fig. 3, boceto 10). Además de renderizar el tipo de iluminación deseada y obtener una presentación visual del contexto, también hemos visualizado analíticamente el gradiente espacial de la luz y el patrón de propagación e intensidad con que es iluminada cada extensión de la superficie receptora (roca). Esto nos facilita la comparación del producto virtual con los márgenes de visibilidad tolerados por el ojo humano (aquí:  $E = 2 \text{ lx}$ ,  $L = 1 \text{ cd/m}^2$ ).

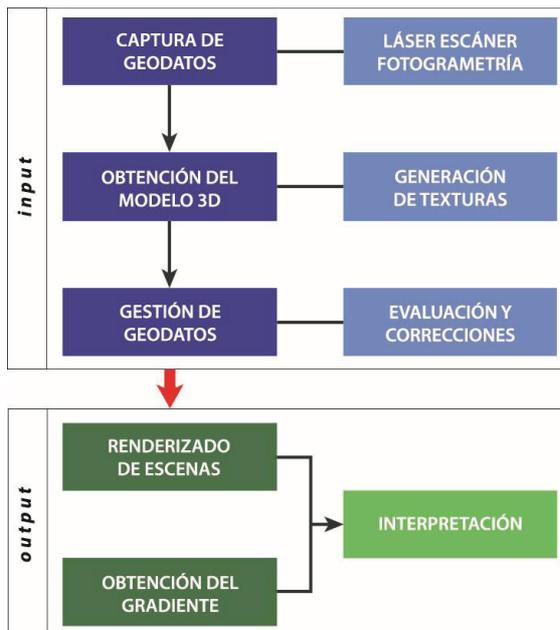


Fig. 5 – Esquema de trabajo.

#### 4. RESULTADOS

Si realmente fueron utilizadas para ello, ¿cómo debió incidir la luz emitida por lámparas de grasa sobre el arte rupestre? Tanto en el caso experimental como en el arqueológico hemos realizado pruebas para observar el comportamiento de una sola fuente aislada y otras con dos fuentes separadas entre sí por 1,5 m para observar su complementación (según la Ley de adición). Todas

las pruebas se han ubicado a una distancia ( $d$ ) de 0,5 y de 1 m respecto a la superficie rocosa que pretendemos iluminar. Asimismo, hemos dado dos intensidades posibles a las emisiones de cada prueba: 1 cd y 0,3 cd (ver Maximiano et al., en prensa). De esto hemos obtenido varias combinaciones de posibles soluciones para cada caso de estudio, de las que también hemos obtenido el gradiente de luz, representándolo en escala logarítmica para aumentar los detalles. Escala gráfica orientativa: 1 m en cada eje ( $x$ - $y$ - $z$ ) dividido en dos partes.

Así pues, la iluminación generada por una sola fuente de  $I = 0,3 \text{ cd}$  es significativamente baja, en el mejor de los casos ( $d = 0,5 \text{ m}$ ) obtenemos  $E < 2 \text{ lx}$ ,  $L < 0,8 \text{ cd/m}^2$  en una extensión de pared menor a  $1 \text{ m}^2$ . De esto inferimos que el uso de lámparas con la intensidad propuesta por S. A. Beaune (1987a) debió realizarse a muy escasa distancia de las representaciones artísticas (menos de 0,5 m). En cambio, el resultado de una sola fuente de  $I = 1 \text{ cd}$  es más alto, aportando valores de  $E > 2,5 \text{ lx}$  y  $L > 1 \text{ cd/m}^2$  (en  $d = 0,5 \text{ m}$ ) sobre extensiones de pared de  $1 \text{ m}^2$  aprox. Sin embargo esta capacidad iluminativa se reduce significativamente cuando se posiciona en  $d = 1 \text{ m}$ , sin mejorar demasiado los resultados obtenidos en 0,3 cd. De esto extraemos que una lámpara de intensidad similar a una vela de cera debió usarse a 1 m de la pared como máximo (Fig. 6).

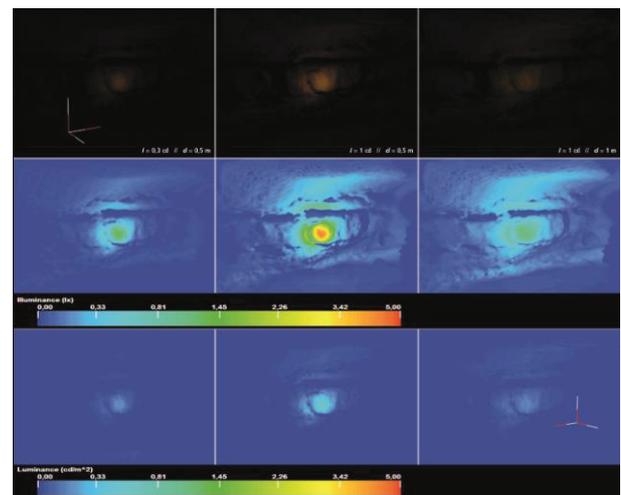


Fig. 6 – Caso experimental, escena renderizada con una sola fuente: apariencia realista (arriba), gradiente de iluminancia (medio) y gradiente de luminancia (abajo).

Para comprobar parte de los grados de libertad, hemos hecho dos pruebas situando dos fuentes de luz de la misma intensidad (1 cd) a una interdistancia de 0,2 m y 1,5 m. Si comparamos los resultados obtenidos observamos que la suma de intensidades separadas por 1,5 m no supone un cambio significativo en la iluminación, por lo que para que esto ocurriera deben estar más cercanas entre sí. No obstante sí permiten iluminar de forma constante una extensión de pared aproximada de unos 3 m<sup>2</sup> (Fig. 7). Esto viene a redundar en lo ya dicho: si bien las intensidades de 1 cd aportan más libertad de movimiento, su uso sigue siendo de corto alcance: localización a no más de 1 m de la pared y, si se quiere aumentar la capacidad lumínica, dos o más lámparas no deberían distar más de 0,4 m entre sí.

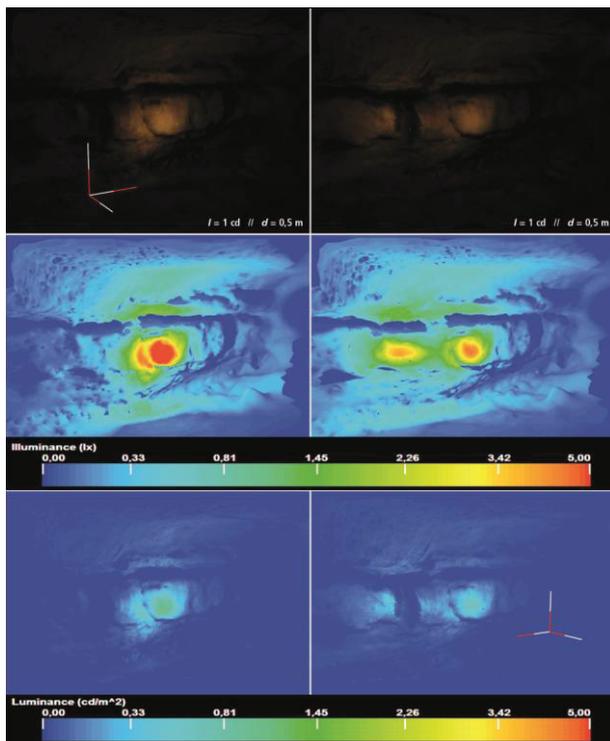


Fig. 7 – Caso experimental, escena renderizada con dos fuentes: 0,2 m de separación (columna izquierda) y 1,5 m (columna derecha). Gradiente de iluminancia (medio) y gradiente de luminancia (abajo).

Si comparamos la intensidad simulada (1 cd) con la real (una vela de cera), comprobamos que no

hay diferencias significativas en la cantidad de espacio iluminado. Por lo que, a pesar de las carencias del modelo en cuanto a propiedades materiales del entorno recreado y de las imágenes tomadas directamente y sin ningún tratamiento (ver discusión), concluimos que el modelo y la simulación se ajustan lo suficiente a la realidad como para poder realizar una propuesta aproximada (Fig. 8).

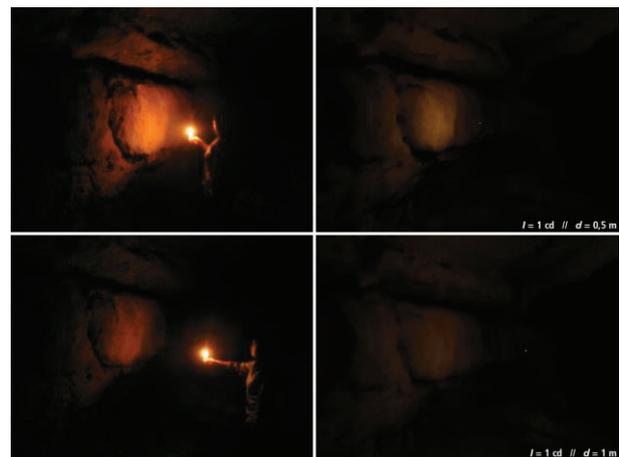


Fig. 8 – Contraste experimental entre intensidades reales y simuladas: vela de cera (1 cd) a 0,5 m de la superficie rocosa (arriba) y a 1 m (abajo).

En el caso arqueológico encontramos valores similares, si bien se puede observar cómo el tipo de espacio condiciona un mayor o menor grado de iluminación. El resultado de la Zona IV (espacio abierto: Fig. 9 y 10) se asemeja al ya visto en el caso experimental (Fig. 6), mientras en la Zona IX (espacio cerrado: Fig. 11) las limitaciones fruto de situar las fuentes de luz en  $d = 1$  m se ven compensadas por la reflectancia ( $E > 2$  lx,  $L > 1$  cd/m<sup>2</sup> en una extensión de pared de unos 2 m<sup>2</sup>), proporcionando mayor iluminación que en los espacios abiertos. Del ejemplo de la Zona IX inferimos que, dadas las limitaciones de estos dispositivos, la interacción con los elementos circundantes puede ser un factor importante a la hora de incrementar los grados de libertad durante la acción de iluminar.

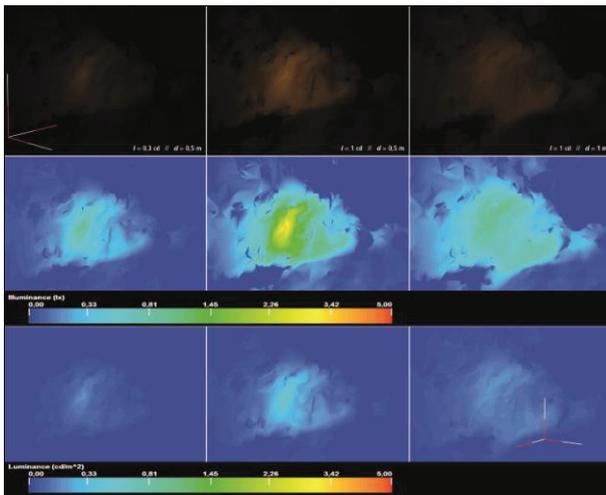


Fig. 9 – Caso arqueológico (Zona IV), escena renderizada con una sola fuente: apariencia realista (arriba), gradiente de iluminancia (medio) y gradiente de luminancia (abajo).

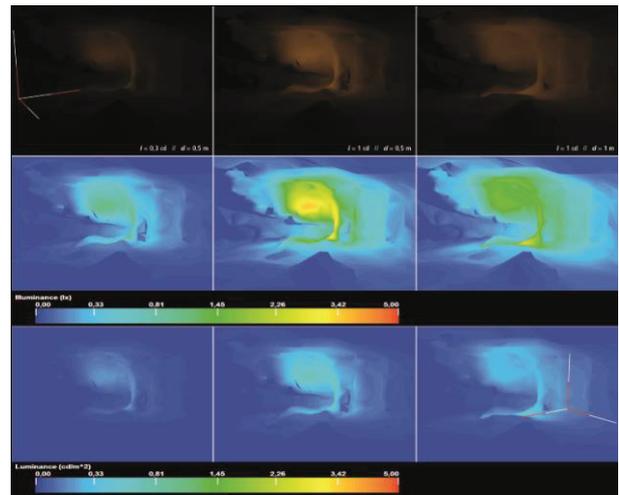


Fig. 11 – Caso arqueológico (Zona IX), escena renderizada con dos fuentes: apariencia realista (arriba), gradiente de iluminancia (medio) y gradiente de luminancia (abajo).

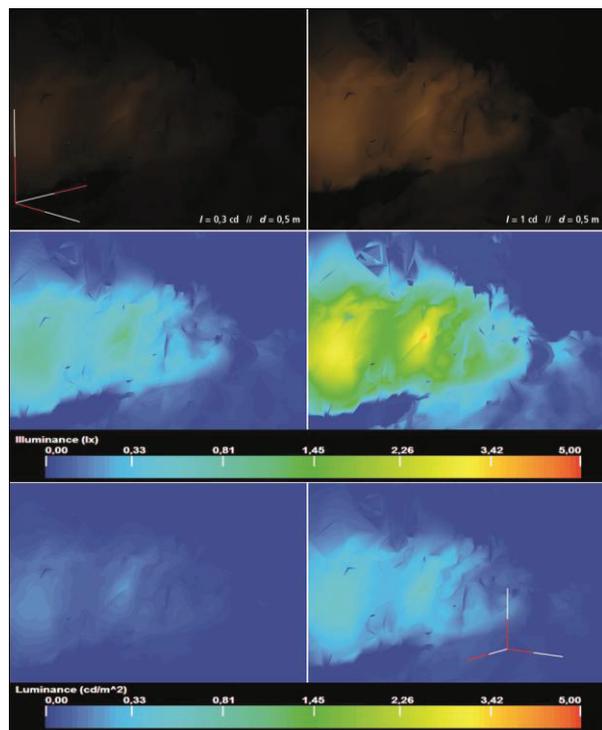


Fig. 10 – Caso arqueológico (Zona IV), escena renderizada con dos fuentes: apariencia realista (arriba), gradiente de iluminancia (medio) y gradiente de luminancia (abajo).

## 5. DISCUSIÓN

El procedimiento y los resultados que aquí presentamos son una primera aproximación a un problema arqueológico definido: la necesaria iluminación de ambientes oscuros para hacer posible las actividades de producción y visualización de arte rupestre. De este modo pretendemos articular las posibilidades que ofrece la tecnología actual con los objetivos ulteriores de la investigación arqueológica, esto es, la interpretación social del registro. Si bien asumimos que los productos digitales obtenidos contienen limitaciones técnicas (cámaras fotográficas no especializadas, el modelo 3D no posee la máxima resolución, ambos modelos digitales se han obtenido a partir de una sola técnica en vez de combinarse, la digitalización hecha por escáner no incluye texturas, etc.), también es cierto que los resultados son prometedores en términos de inferencia arqueológica, abriendo la posibilidad de perfeccionar el proceso hacia modelos mucho más precisos (ver Cabrelles y Lerma, 2013). De igual modo, en el actual nivel de desarrollo, no contamos (aún) con datos sobre las propiedades materiales de las paredes y los pigmentos, por lo que los efectos derivados de ello no han sido tratados en profundidad (reflectancia,

transmitancia y absorción de luz por parte la pared rocosa). A lo que debe sumarse la apariencia final de las texturas, tomadas mediante fotografía bajo una necesaria iluminación que puede introducir ciertas diferencias en la apariencia posterior (limitaciones inevitables en la captura de geodatos). A pesar de ello, consideramos que este trabajo puede sentar un precedente para una nueva perspectiva en el estudio del arte rupestre a través de medios virtuales, e incluso, para la puesta en valor y difusión del patrimonio.

Asumimos también que la flexibilidad de los resultados obtenidos se debe a un componente de incertidumbre, inherente a la problemática y que hemos tratado de controlar. Frente a otros casos, donde sí existen emplazamientos fijos de las fuentes emisoras (ver Medina et al., 2012), nuestro trabajo realiza una exploración de los límites probables que auto-impone la luz, dado el medio de producción de la misma (lámparas) y las características de la superficie sobre la que incide (relieve, posibilidad de reflectancia, etc.). A partir de los resultados de múltiples simulaciones con distintas configuraciones, proponemos algunas consideraciones e hipótesis:

- una sola lámpara genera suficiente luz para realizar tareas de producción y visualización, sin embargo solo es eficiente a cortas distancias. La combinación de dispositivos mejora las posibilidades, aún así es un instrumento limitado. No consideramos que sea un instrumento eficaz a distancias mayores de un 1 m (la interacción a corta distancia puede vincularse al contexto social: ver Clottes, 2008).
- la parcialidad de algunas pinturas y grabados podría no ser un *output* tafonómico, sino parte del producto original; es decir, que los restos observados son muy poco dependientes de sus circunstancias de conservación y están más relacionados con la intención creativa de los agentes que las produjeron y visualizaron. Esto quedaría confirmado si lo que la investigación considera una

“ausencia por baja preservación” en realidad está provocando algún efecto visual a la representación artística en el momento de su visionado (ver ejemplo en Devlin et al., 2002).

- la capacidad de las lámparas genera una iluminación que imposibilita visualizar simultáneamente grandes superficies a menos que se emplee una gran cantidad de ellas. La visualización de las pinturas pudo hacerse de manera “fragmentada”; es decir, la posibilidad de alumbrar los motivos artísticos condiciona cuántos de ellos pueden ser vistos al mismo tiempo, lo que puede condicionar la lectura de los paneles de arte rupestre.
- de la posible interacción agentes-luz-arte extraemos la siguiente hipótesis. Si el mismo agente visualiza y sostiene una o dos lámparas a la vez, su rango de visión se reduce a unos 2 ó 3 m<sup>2</sup> según el caso, ergo la persona no podrá observar todas expresiones artísticas que alberga la pared si éstas se extienden más allá de ese campo de visión. Del mismo modo, si una persona pudiera observar una extensión más grande o varios motivos separados por más de 2,5 m aprox., esto significa que un segundo agente ilumina mientras el primero mira desde cierta distancia. Estas dos deducciones pueden derivar en dos posibles tipos de visualización: “directo” o “indirecto”. En el primero, el agente es independiente a la hora de combinar los motivos que pretenda ver (acción de visualización individual); en el segundo caso, la visualización depende de la combinatoria que realice un segundo (o más) agentes involucrados en un juego de roles comunicativos (acción de consumo colectivo).

Las propuestas anteriores son el resultado de la comparación y un análisis cuantitativo de diversas escenas renderizadas; la formulación de hipótesis deja ya entrever el potencial del análisis virtual de la dimensión espacial. Así, surgen dos posibilidades opuestas: la capacidad de iluminar una superficie de poca extensión *versus* una gran

extensión. La primera podría ayudar a aislar las representaciones de un conjunto mayor según la iluminancia recibida (por ejemplo: extensión que, como mínimo, esté iluminada por 2 lx o que desprenda 1 cd/m<sup>2</sup>); en tal caso, los resultados podrían incluirse como apoyo de estudios interpretativos posteriores. Las limitaciones que imponen los medios de iluminación respecto a la segunda posibilidad

permitirían, o bien descartarla, o bien proponer comportamientos complejos para la producción y visualización: cuántas personas son necesarias para sostener lámparas, si existen posibles puntos de apoyo, tipos de acciones, etc. De cualquier manera las aportaciones son significativas y sustancialmente integrables en un enfoque holístico que trate de explicar el arte rupestre desde todas sus facetas.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Dr. Pablo Arias (IIIPC, UC) y al Dr. Roberto Ontañón (IIIPC, MUPAC), directores del Complejo Arqueológico de La Garma, su predisposición y colaboración. Este artículo forma parte de una línea de investigación emergente y propia que aún no está consolidada, por lo que las deficiencias y errores son exclusivamente de los autores de este artículo. Contacto:

[camilobarciagarcia@gmail.com](mailto:camilobarciagarcia@gmail.com) (C. B.)

[maximianocastillejo@gmail.com](mailto:maximianocastillejo@gmail.com) (A. M.)

## REFERENCIAS

- ARIAS, P. (2009): "Rites in the Dark? An evaluation of the current evidence for ritual areas at Magdalenian cave sites", en *World Archaeology*, 41 (2), pp. 262-294.
- ARIAS, P, GONZÁLEZ, C., MOURE, A., ONTAÑÓN, R. (2001): *La Garma: un descenso al pasado (2ª edición)*, Consejería de Cultura, Turismo y Deporte del Gobierno de Cantabria, Santander.
- BEAUNE, S. A. (1987a): *Lampes et godets au Paléolithique*, XXIIIème supplément à Gallia Préhistoire, CNRS, Paris.
- BEAUNE, S. A. (1987b): "Palaeolithic lamps and their specialization: a hypothesis", en *Current Anthropology*, 28 (4), pp. 569-577.
- BEAUNE, S. A. (2000): "Les techniques d'éclairage paléolithiques: un bilan", en *Paleo*, 12, pp. 19-27.
- BEAUNE, S. A. (2003): "De la domestication du feu aux premières lampes", en *Nouveautés lychnologiques* (ed. L. Chrzanovski). LychnoServices, Hauterive, pp. 13-20.
- BEAUNE, S. A., WHITE, R. (1993): "Ice Age lamps", en *Scientific American*, 266 (3), pp. 108-113.
- CABRELLES, M., LERMA, J. L. (2013): "Documentación 3D de abrigos rupestres a partir de láser escáner y de procesos fotogramétricos automatizados", *Virtual Archaeology Review*, 4 (8), pp. 64-68.
- CLOTTES, J. (2008): "El chamanismo paleolítico: fundamentos de una hipótesis", en *Veleia*, 24-25, pp. 269-284.
- COLOMBO, E., O'DONELL, B. (2006): "Luz, color y visión", en *Manual de iluminación eficiente* (ed. ELI), Universidad Tecnológica Nacional, Argentina [URL: <http://www.edutecne.utn.edu.ar/eli-iluminacion/eli.html>]. Acceso: 14/4/2014.
- DAWSON, P., LEVY, R., GARDNER, D., WALLS, M. (2007): "Simulating the behaviour of light inside arctic dwellings: implications for assessing the role of vision in task performance", en *World Archaeology*, 39 (1), pp. 17-35.

- DEVLIN, K., CHALMERS, A., BROWN, D. (2002): "Predictive lighting and perception in archaeological representations", en *Conference proceedings of UNESCO World Heritage in the Digital Age: 30th Anniversary Digital Congress (October, 2002)*, [URL: [http://doc.gold.ac.uk/~mas01dl/CIS224b/unesco\\_paper.pdf](http://doc.gold.ac.uk/~mas01dl/CIS224b/unesco_paper.pdf)]. Acceso: 14/4/2014.
- DOMINGO, I., VILLAVERDE, V., LÓPEZ, E., LERMA, J. L., CABRELLES, M. (2013): "Reflexiones sobre las técnicas de documentación digital del arte rupestre: la restitución bidimensional (2D) versus la tridimensional (3D)", *Cuadernos de Arte Rupestre*, 6, pp. 21-32.
- FORTE, M. (2011): "Cyber-Archaeology: notes on the simulation of the past", en *Virtual Archaeology Review*, 2 (4), pp. 7-18.
- FRIEMAN, C., GILLINGS, M. (2007): "Seeing is perceiving?", en *World Archaeology*, 39 (1), pp. 4-16.
- FRISCHER, B., DAKOURI-HILD, A. (eds.) (2008): *Beyond illustration: 2D and 3D digital technologies as tools for discovery in archaeology*. BAR International Series 1805, Archaeopress, Oxford.
- FRITZ, C., TOSELLO, G. (2007): "The hidden meaning of forms: methods of recording Paleolithic parietal art", en *Journal of Archaeological Method and Theory*, 14 (1), pp. 48-80.
- GUTIÉRREZ, D., SUNDSTEDT, V., GÓMEZ, F., CHALMERS, A. (2008): "Modelling light scattering for virtual heritage", en *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 1 (2), [URL: [http://giga.cps.unizar.es/~diegog/ficheros/pdf\\_papers/2000952\\_LR.pdf](http://giga.cps.unizar.es/~diegog/ficheros/pdf_papers/2000952_LR.pdf)]. Acceso: 14/4/2014.
- HAPPA, J., MUDGE, M., DEBATTISTA, K., ARTUSI, A., GONÇALVES, A., CHALMERS, A. (2010): "Illuminating the past: state of the art", en *Virtual Reality*, 14 (3), pp. 155-182.
- ISHIDA, T. (2002): "Color identification data obtained from photopic to mesopic illuminance levels", en *Color Research & Application*, 27 (4), pp. 253-259.
- JACOBS, A. (2004): "Fundamentals", en *SynthLight Handbook: European educational infrastructure on energy efficient lighting technologies assisted by 3D environments* (eds. A. Tsangrassoulis, A. Synnefa, A. Jacobs, M. Wilson, J. Solomon, M. Fontoynt, W. Pohl, A. Zimmermann). LEARN, London Metropolitan University, [URL: <http://www.new-learn.info/packages/synthlight/index.html>]. Acceso: 14/4/2014.
- LERMA, J. L., NAVARRO, S., CABRELLES, M., VILLAVERDE, V. (2010): "Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study" en *Journal of Archaeological Science*, 37, pp. 499-507.
- LERMA, J.L., CABRELLES, M., NAVARRO, S., SEGUI, A.E. (2013): "Modelado fotorrealístico 3D a partir de procesos fotogramétricos: láser escáner versus imagen digital", en *Cuadernos de Arte Rupestre*, 6, pp. 85-90.
- LI, X., RUAN, D., VAN DER WAL, A. J. (1998): "Discussion on soft computing at FLINS '96", en *International Journal of Intelligent Systems*, 13 (2-3), pp. 287-300.
- LLOBERA, M. (2011): "Archaeological visualization: towards an Archaeological Information Science (AISc)", en *Journal of Archaeological Method and Theory*, 18 (3), pp. 193-223.
- MAXIMIANO, A. M., BARCIA, C. (2014): "La simulación de luces en entornos 3D como vía experimental para percibir la producción y el consumo del arte rupestre en cuevas", en *4º Congreso Internacional de Arqueología Experimental (Burgos, 8-11 de mayo, 2014)*.
- MAXIMIANO, A. M., BARCIA, C., ARIAS, P., ONTAÑÓN, R. (en prensa): "Luces en la oscuridad: soft computing para el arte rupestre en el sitio magdalenense de la Galería Inferior de La Garma (Omoño, Cantabria, España)", en *Simposio Iberoamericano de Arqueología Espacial (Santander, 21-23 de octubre, 2013)*.

- MASUDA, T., YAMADA, Y., KUCHITSU, N., IKEUCHI, K. (2006): "Sunlight illumination simulation for archaeological investigation: case study of the Fugoppe Cave" en *Proceedings of the Tenth International Conference on Virtual Systems and Multimedia: Hybrid Realities & Digital Partners. Explorations in Art, Heritage, Science & the Human Factor (17-19 November 2004, Softopia Japan, Ogaki City, Japan)* (ed. H. Thwaites). IOS Press, Amsterdam, pp. 850-859.
- McCOY, M. D., LADEFOGED, T. N. (2009): "New developments in the use of spatial technology in archaeology", en *Journal of Archaeological Research*, 17, pp. 263-295.
- MEDINA, M. A., CRISTO, A., ROMERO, A., SANCHIDRIÁN, J. L. (2012): "Otro punto de luz. Iluminación estática en los 'santuarios' paleolíticos. El ejemplo de la Cueva de Nerja (Málaga, España)", en *L'art pléistocène dans le monde. Actes du Congrès IFRAO, Tarascon-sur-Ariège, septembre 2010. Symposium «Art mobilier pléistocène»* (dir. J. Clottes). Numéro spécial de Préhistoire, art et sociétés, Bulletin de la Société Préhistorique Ariège-Pyrénées LXV-LXVI, pp. 105-121.
- MIDDLETON, W. E. K., MAYO, E. G. (1952): "The appearance of colors in twilight", *Journal of the Optical Society of America*, 42, pp. 116-121.
- ONTAÑÓN, R. (2003): "Sols et structures d'habitat du Paléolithique Supérieur, nouvelles données depuis les Cantabres: la Galerie Inférieure de La Garma (Cantabrie, Espagne)", en *L'Anthropologie*, 107, pp. 333-363.
- ORTEGA, P. (2014): "Visibility: a new outlook to the study of Palaeolithic art. Preliminary research", en *Debating Spatial Archaeology: proceedings of the international workshop on Landscape and Spatial Analysis in archaeology (Santander, June 8-9<sup>th</sup>, 2012)* (eds. A. García, J. García, A. M. Maximiano y J. Ríos-Garaizar). Publicaciones III PC, Santander, pp. 259-266.
- PAPADOPOULOS, C., EARL, G. (2014): "Formal three-dimensional computational analyses of archaeological spaces", en *Spatial analysis and social spaces: interdisciplinary approaches to the interpretation prehistoric and historic built environments* (eds. E. Paliou, U. Lieberwirth, S. Polla). De Gruyter, Berlin, pp. 135-165.
- PASTOORS, A., WENIGER, G.-C. (2011): "Cave art in context: methods for the analysis of the spatial organization of cave sites", en *Journal of Archaeological Research*, 19 (4), pp. 377-400.
- RASILLA, M., DUARTE, E., SANTAMARÍA, D., MARTÍNEZ, L., FERNÁNDEZ, J., RODRÍGUEZ, V., FORTEA, J. (2010): "Licnología paleolítica: las lámparas de las cuevas de Llonín y El Covarón (Asturias)", en *Zephyrus*, LXV, pp. 116.
- SÁNCHEZ, D. (2013): "Los sistemas de iluminación en el Paleolítico parte 3: las lámparas portátiles en la Península Ibérica", [URL: <http://prehistorialdia.blogspot.com.es/2013/01/los-sistemas-de-iluminacion-en-el-30.html#.U0qDVaIUUpQR>]. Acceso: 14/4/2014.
- SCHUBERT, E. F. (2006): *Light-emitting diodes*. Cambridge University Press, Cambridge.
- SHIN, J. C., YAGUCHI, H., SHIOIRI, S. (2004): "Change color appearance in photopic, mesopic and scotopic vision", en *Optical Review*, 11 (4), pp. 265-271.
- STAL, C., VAN LIEFFERINGE, K., DE REU, J., DOCTER, R., DIERKENS, G., DE MAEYER, P., MORTIER, S., NUTTENS, T., PIETERS, T., VAN DEN EIJNDE, F., VAN DE PUT, W., DE WULF, A. (2014): "Integrating geomatics in archaeological research at the site of Thorikos (Greece)", en *Journal of Archaeological Science*, 45, pp. 112-125.
- TAYLOR, A. E. F. (2000): *Illumination fundamentals*, Lighting Research Center, R. Polytechnic Institute.
- VERDEGAY, J. L., YAGER, R. R., BONISSONE, P. P. (2008): "On heuristics as a fundamental constituent of soft computing", en *Fuzzy sets and systems*, 159, pp. 846-855.