



## DIGITALIZACIÓN DE CUEVAS CON ARTE PALEOLÍTICO PARIETAL DE BIZKAIA. ANÁLISIS CIENTÍFICO Y DIVULGACIÓN MEDIANTE NUEVAS TÉCNICAS DE VISUALIZACIÓN

### VIRTUAL DIGITIZATION OF CAVES WITH PARIETAL PALEOLITHIC ART FROM BIZKAIA. SCIENTIFIC ANALYSIS AND DISSEMINATION THROUGH NEW VISUALIZATION TECHNIQUES

Andoni Iturbe<sup>a</sup>, Rocío Cachero<sup>b,\*</sup> , David Cañal<sup>b</sup>, Antonio Martos<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Servicio de Patrimonio Cultural, Diputación Foral de Bizkaia, Calle María Díaz de Haro, 11, 48013 Bilbao, España.  
[andoni.iturbe@bizkaia.eus](mailto:andoni.iturbe@bizkaia.eus)

<sup>b</sup> Dogram Ingeniería de Documentación Tridimensional, Parque Tecnológico de Asturias, edificio CEEI, 33428 Llanera, España.  
[rocio@dogram.es](mailto:rocio@dogram.es); [david@dogram.es](mailto:david@dogram.es); [martos@dogram.es](mailto:martos@dogram.es)

#### Lo más destacado:

- Se presenta una reproducción virtual de cuevas paleolíticas con grabados y pinturas de calidad que combina técnicas fotogramétricas y topográficas.
- La metodología de trabajo fotogramétrico permite alcanzar una reproducción fiel tanto de la geometría como de la apariencia de las cuevas.
- Se apuesta por la divulgación mediante técnicas de realidad virtual inmersiva y métodos interactivos de visualización.

#### Abstract:

We present three case studies illustrating the virtual reproduction of caves that belong to the most important artistic ensemble of the Paleolithic from Bizkaia (Spain): Benta Laperra, Askondo and Lumentxa. The complex morphology of the cavities, the fineness of their engravings and the poor definition of their paintings imply technical difficulties to achieve faithful reproduction of their geometry and appearance. The methodology applied in these caves, based on a combination of photogrammetric and surveying techniques, allows the creation of a complete virtual replica, without shadow zones and a detailed reproduction of their engravings and paintings. At the same time, this replica has given rise to a type of technical documentation that very faithfully and objectively facilitates the analysis and interpretation of the cave. On the one hand, series of longitudinal and transverse sections have been generated, extracting information of the cut profile and the projection of the surfaces through orthoimages of elevation-section with a level of resolution of 2 mm per pixel, equivalent to a scale of representation 1/10. In addition, the georeferencing of the caves has allowed the research team to generate cartography of elevations of floor and ceiling by means of contour lines and to overlap the cartography of the National Geographic Institute (IGN) to measure the distance that separates the ceiling of the cave from the external surface. It can be used to detect critical points that must be taken into account in case of possible actions in forestry or infrastructure projects. Finally, these virtual replicas allow the dissemination of a wealth in detail, through new interactive methods of visualization and virtual reality. In conclusion, the presented methodology means an advance with respect to the existing techniques thus providing solutions for both technical and informative applications.

**Keywords:** virtual archaeology; 3D reconstruction; close-range photogrammetry; orthoimage; parietal art; surveying

#### Resumen:

Presentamos tres casos de estudio que ilustran la reproducción virtual de las cuevas pertenecientes al conjunto artístico más importante del paleolítico en Bizkaia (España): Benta Laperra, Askondo y Lumentxa. La compleja morfología de las cavidades, la finura de sus grabados y la poca nitidez de sus pinturas suponen dificultades técnicas para lograr la reproducción fiel de su geometría y apariencia. La metodología aplicada en estas cuevas, basada en una combinación de técnicas fotogramétricas y topográficas, permite la creación de una réplica virtual completa, con inexistencia de zonas de sombra y con una reproducción detallada de sus grabados y pinturas. A su vez esta réplica ha dado lugar a un tipo de documentación técnica totalmente fiel y objetiva que facilita enormemente el análisis y la interpretación de la cueva. Por un lado, se han generado una serie de cortes longitudinales y transversales, extrayendo la información del perfil de corte y la proyección de las superficies a través de ortofotografías de alzado-sección con un nivel de resolución de 2 mm por pixel, equivalente a una escala de representación 1/10. Además la georreferenciación de las cuevas ha permitido al equipo de trabajo generar cartografía de alturas de suelos y techos mediante curvas de nivel y superponer la cartografía del Instituto Geográfico Nacional (IGN) para medir la distancia que separa el techo de las cuevas de la superficie exterior,

\* Corresponding author: Rocío Cachero, [rocio@dogram.es](mailto:rocio@dogram.es)



permitiendo detectar puntos críticos a tener en cuenta en las posibles actuaciones de proyectos forestales o de infraestructuras. Finalmente, estas réplicas virtuales permiten dar a conocer al gran público la riqueza en detalle, a través de nuevos métodos interactivos de visualización y realidad virtual. En conclusión, la metodología presentada supone un avance respecto a las técnicas existentes ofreciendo soluciones tanto para aplicaciones técnicas como divulgativas.

**Palabras clave:** arqueología virtual; reconstrucción 3D; fotogrametría de objeto cercano; ortofotografía; arte parietal; topografía

## 1. Origen del proyecto

En 2005, el Servicio de Patrimonio de la Diputación Foral de Bizkaia, bajo la dirección de D. Andoni Iturbe, se plantea implantar un modelo de gestión para la cueva de Santimamiñe con los siguientes objetivos:

- Garantizar la conservación de las cuevas.
- Facilitar la divulgación de las pinturas al público general.
- Realizar una investigación técnica exhaustiva de las cuevas.

En aquel momento no se encontró ningún modelo de gestión a nivel nacional y europeo que cumpliera estos objetivos y fuera sostenible. Únicamente la Cueva de Altamira en Cantabria (España) cuenta desde 2001 con una reconstrucción científica llamada Neocueva que recrea el vestíbulo y la sala de los policromos de la Cueva de Altamira, dando solución a los graves problemas de conservación de los últimos años y restringiendo el acceso a la cueva real (Lasheras, De, Heras, & Prada, 2015). No obstante, esta solución fue descartada, ya que condicionaba fuertemente el presupuesto, tanto para la puesta en marcha del proyecto, como para el mantenimiento.

Fue así como la creación de una réplica virtual cobró fuerza, siendo un modelo de gestión más sostenible e interesante desde el punto de la investigación. Se creó un modelo basado en tecnología informática formando un equipo multidisciplinar de veinte técnicos: informáticos, arqueólogos, restauradores, arquitectos...

El principal inconveniente fue encontrar profesionales especializados en la realización de réplicas virtuales de cuevas. Finalmente, un equipo especializado en infografía asumió el reto de realizar la réplica a partir de un escaneado láser (Barrera Mayo, 2008).

Desde entonces, los turistas tienen la oportunidad de conocer la caverna sin dañar el patrimonio del yacimiento, ya que las altas cantidades de CO<sub>2</sub> producidas por el tránsito de usuarios deterioran el conjunto de las pinturas de la cavidad.



**Figura 1:** Imagen de la visita virtual a la cueva de Santimamiñe que puede realizarse en la Sala de Proyecciones de Santimamiñe (copyright [www.virtualware.es](http://www.virtualware.es)).

En el año 2008, la Cueva de Santimamiñe, junto con el resto de cuevas del arte paleolítico del Norte de España fueron declaradas Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO. La sostenibilidad de este modelo hizo posible implantarlo en el resto de cuevas de Bizkaia, realizando réplicas virtuales de todas ellas durante los años 2015 y 2016 (Fig. 1).

Las réplicas virtuales de las cuevas presentadas en este artículo fueron realizadas por el equipo de Dogram Ingeniería de documentación tridimensional, especializado en la creación de réplicas virtuales mediante técnicas fotogramétricas.

## 2. Estado de la técnica

En los últimos años han surgido grandes avances entorno a la captura y reproducción virtual del patrimonio cultural que engloba todo tipo de elementos, desde pequeños restos arqueológicos, esculturas, hasta grandes tamaños, edificios, excavaciones, cuevas, etc. La fotogrametría y el escaneado láser han cobrado protagonismo dejando atrás a las mediciones tradicionales, fotografías, anotaciones, dibujos, delineaciones, etc. gracias a la trazabilidad de su uso y a los resultados ofrecidos.

Sin embargo, cada tipología de trabajo supone un reto para alcanzar una réplica fidedigna y también para simplificar el método de captura velando siempre por conseguir un mínimo impacto en el original.

Es necesario conocer las ventajas y limitaciones de cada técnica para poder emplear la más adecuada en todo momento. En el caso de los restos arqueológicos, cuando el objeto es alcanzar una digitalización que incluya restos muy finos, habituales en los trazos de los grabados, bien por el desgaste que se ha podido producir a lo largo de tiempo, bien por la precisión de los útiles empleados por el artista, es habitual el uso del escáner láser de brazo. Este sistema alcanza un espaciado mínimo entre puntos de 40 µm en algunos modelos. Sin embargo, una combinación de técnicas fotogramétricas y estéreo-fotométricas permiten alcanzar por primera vez un alto nivel de similitud con el original, reproduciendo detalles de hasta 7 µm, como se ha demostrado en la réplica de diente de cachalote con bisonte grabado perteneciente al Museo Arqueológico de Asturias (Cachero & Abello, 2015).

Para trabajos de media, gran escala del ámbito del patrimonio cultural, las dimensiones y altura son las características principales que determinan el método. La aparición del escáner láser en el mercado revolucionó el mundo de la digitalización 3D al proporcionar una gran cantidad de datos de forma automática en plazos cortos de tiempo (Cano, Lamolda, Torres, & Villafranca, 2010). Sin embargo, presenta desventajas frente a la fotogrametría debido al elevado coste de los equipos, el tratamiento posterior de los datos y la falta de información y aparición de zonas de

sombra en zonas altas. Para solventar estas desventajas, viene siendo habitual la combinación de técnicas de escaneo láser y fotogrametría (Cabrelles López & Lerma García, 2015).

Además, en los últimos años, la introducción de los sistemas de aeronaves tripuladas por control remoto (RPAS) ha sido determinante para el impulso del desarrollo de herramientas fotogramétricas tanto libres como de pago, que ofrecen resultados muy aparentes (Eltner & Schneider, 2015) y acercan esta tecnología incluso a técnicos no expertos.

En la tipología de proyectos que nos ocupa presenta como retos la dificultad de acceso, la no existencia de iluminación natural, la complejidad geométrica, la finura de los grabados y la apariencia difusa de las pinturas murales. En los últimos años, el método utilizado para la digitalización de cuevas y la obtención de una réplica virtual ha sido por un lado, realizar un escaneo láser que permita obtener la geometría de la cueva, y por otro lado, realizar fotografías para por rectificación de imagen dar textura al modelo tridimensional (3D) obtenido del escáner láser (Lerma García, Cabrelles López, Navarro Tarín, & Galcerá Ustero, 2010). En 2017, se está avanzando en la combinación de técnicas de escaneo láser y fotogrametría mediante RPAS y de objeto cercano para obtener réplicas más completas y fidedígnas (Majid et al., 2017). Sin embargo, estas combinaciones de técnicas, continúan siendo procesos laboriosos y con resultados parcialmente buenos y aparentes ya que ofrecen modelos individuales de las zonas de pinturas prehistóricas y una nube de puntos de la cavidad, pero concluir en un modelo 3D global de la cueva con geometría texturizada de alta resolución que permita una experiencia totalmente inmersiva sigue siendo un reto.

Cabe considerar la introducción de la gestión del color verdadero en el patrimonio cultural (Ruiz & Pereira, 2014) como herramienta indispensable para la digitalización de pigmentos de pintura mural con el fin de obtener un registro preventivo y facilitar estudios e investigaciones.

### 3. Introducción

La digitalización de las cuevas tenía por objetivo obtener una réplica virtual completa para cada una de ellas, minimizando las zonas ocultas y con una reproducción detallada de los grabados y las pinturas que garantizase su conservación.

A su vez, las réplicas darían lugar a un tipo de documentación técnica totalmente fiel y objetiva que facilite el análisis e interpretación de la morfología de la cueva.

Finalmente, estas réplicas virtuales permitirían dar a conocer al gran público la riqueza en detalle de este patrimonio a través de nuevos métodos interactivos de visualización y realidad virtual.

La metodología empleada ha sido desarrollada por Dogram en el marco del proyecto de I+D 'Técnicas avanzadas para la documentación 3D de bienes culturales' financiado por el Instituto de Desarrollo Económico del Principado de Asturias y la Unión Europea a través del programa FEDER. Esta metodología basada únicamente en fotogrametría, permite obtener un modelo 3D de la cueva con

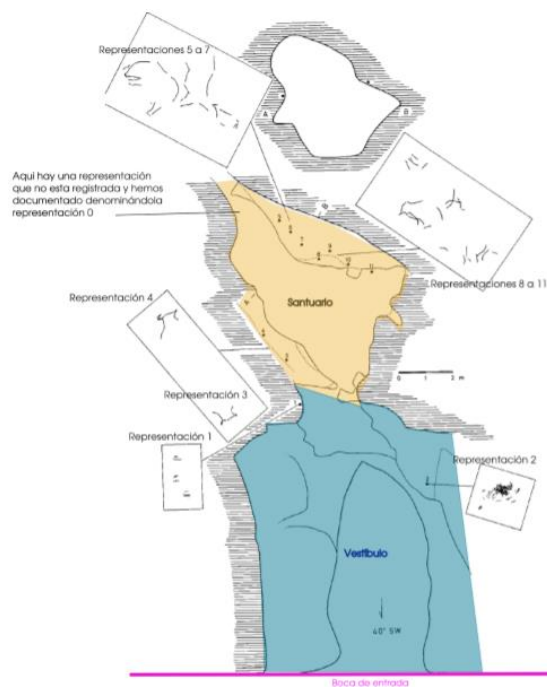
geometría y textura real, de manera que la información 3D de geometría y textura se obtiene únicamente a partir de fotografías desde distintos ángulos empleando técnicas de fotogrametría convergente de objeto cercano, lo que facilita además la digitalización total sin zonas de sombra, al poder situar la cámara en zonas de paso estrecho donde el láser escáner no puede acceder por dimensiones del instrumento. Esta metodología requiere de un trabajo de campo cuidadoso y simplifica la gestión de datos en oficina.

#### 3.1. Cueva Venta Laperra

La cueva Venta Laperra se localiza en el valle de Karrantza, provincia de Bizkaia, País Vasco (España). Es visible desde la carretera Karrantza/Ramales cerca del límite provincial, puesto que la boca es de grandes dimensiones y se abre en una pared vertical de gran visibilidad (Gorrotxategi Anieto, 2000).

Las dimensiones aproximadas de la boca son de 7 m de ancho por 11 m de alto, el vestíbulo es de dimensiones reducidas de 4 x 8 m. Pasado el mismo, aparece un desnivel casi vertical de 4 m que se salva actualmente mediante unas escaleras metálicas que permiten acceder a una balconada de 1.8 m de ancho donde se encuentran las primeras representaciones abstractas denominadas 1 y 2. De ella parte una galería de 10 m de longitud, 4.6 m de altura y cuyo ancho oscila entre 2 y 4.7 m. Aquí es donde se emplaza el santuario, en el lateral izquierdo aparecen 3 representaciones. En el lateral derecho de la sala a media altura se sitúan el resto de representaciones de 5 a 11 m.

Todas las representaciones de la cueva son grabados de arte parietal: líneas abstractas, bisontes, un oso y un uro (Fig. 2). La cueva tiene además un sondeo arqueológico realizado en el suelo del santuario en 1931 por J. M. Barandiarán.



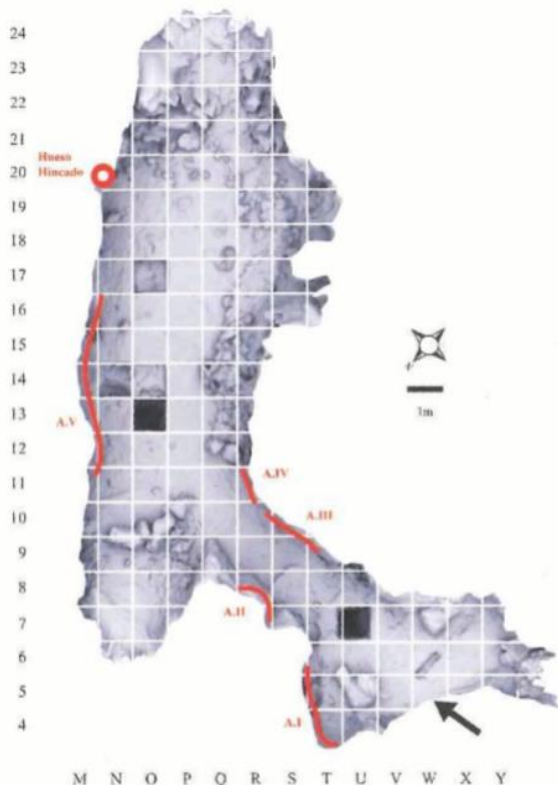
**Figura 2:** Planta esquemática de la cueva Venta Laperra que incluye mediante código de colores las tres zonas en las que se divide la cavidad, boca de entrada (rosa), vestíbulo (azul), santuario (amarillo) y la posición de las representaciones (Gorrotxategi Anieto, 2000).

### 3.2. Cueva de Askondo

La cueva de Askondo se localiza en la localidad de Mañaria, provincia de Bizkaia, País Vasco (España). En este caso, dadas las dimensiones de la totalidad de la cueva, con un desarrollo lineal de unos 302 m, la réplica comprende la total reproducción del sector A de la cueva que alberga las representaciones más importantes. Sus dimensiones totales aproximadas son 21 m de largo por 6 m de ancho y 7 m de alto.

El primer espacio, totalmente iluminado de manera natural, viene dado por una hoya de erosión que forma una planta subcircular de techo bajo, de unos 250 cm y aproximadamente unos 400 cm de anchura que decrece en altitud. A unos 3 m del corte generado por la cantera en la boca de la cueva y después de superar la hoya de erosión, el espacio se estrecha en anchura dando lugar a un corto pasaje que enseguida se abre hacia el vestíbulo de la cavidad. El vestíbulo es un espacio amplio con un techo alto y de desarrollo perpendicular a la entrada. Su tramo inicial recibe todavía la luz exterior siendo así un espacio en penumbra aunque según nos desplazamos a derecha la oscuridad es total (Garate Maidagan & Rios Garaizar, 2012).

El sector A (Fig. 3) alberga un total de cinco paneles, en su mayoría pinturas aunque también hay algún grabado, y sondeos arqueológicos realizados en el suelo del vestíbulo (Rios Garaizar, Garate Maidagan, & Regalado Bueno, 2012).



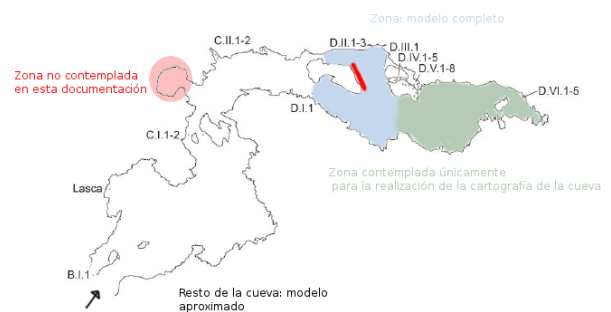
**Figura 3:** Planta del sector A de la cueva de Askondo que incluye la posición de las representaciones así como las excavaciones. La flecha negra indica la entrada actual a la cueva (Rios Garaizar, Garate Maidagan, & Regalado Bueno, 2012).

### 3.3. Cueva Lumentxa

La cueva de Lumentxa, se localiza en la localidad de Lekeitio, provincia de Bizkaia, País Vasco (España). La cueva (Fig. 4) tiene una entrada de modestas dimensiones (2.5 x 3.5 m) orientada al suroeste. Esta entrada da paso a un vestíbulo de grandes dimensiones y morfología cuadrangular (18 x 9 m aproximadamente). Esta sala alcanza su máxima altura (6.5 m) en la mitad derecha de la cueva, abriéndose incluso en su parte más alta al lapiaz exterior, mientras que hacia el lado izquierdo la distancia entre el suelo y el techo se reduce de manera brusca. En esta sala se desarrollaron el grueso de las excavaciones de (Garete Maidagan, Garaizar Rios, & Ruiz Redondo, 2013).

Al fondo de la sala principal, en su lado izquierdo, se abre un pasillo curvo prácticamente cerrado por columnas estalagmíticas por la que se progresa a través de pasos estrechos, uno de los cuales está cegado por un cúmulo artificial de bloques parcialmente calcitado. Este pasillo comunica con una galería de unos 50 m de longitud que alcanza el final de la cueva. En ella se pueden distinguir cinco tramos. El primero es de techos más bajos que los del vestíbulo. A unos 12 m del inicio de la galería esta se estrecha y bifurca bordeando un gran bloque caído del techo en una de cuyas caras se localiza el panel de los bisontes. Por el lado izquierdo del bloque se atraviesa un estrecho paso que da acceso directamente a un espacio semicircular de unos 5 m de diámetro. A este espacio se accede también desde el tramo de galería que se abre desde el lado derecho de la bifurcación. En este punto se localizan una gran cantidad de bloques imbricados de dimensiones ciclópeas. Una vez pasados los bloques se accede a los tramos finales de la galería. Primero se alcanza una zona ancha que conforma una especie de sala circular de techos irregulares desde la cual se alcanza el último tramo. Este muestra un estrechamiento progresivo, con abundantes formaciones estalagmíticas a ambos lados de la galería, hasta que se abre de nuevo al exterior mediante una pequeña entrada, abierta por la erosión de la ladera, que está cerrada también con una verja.

El panel principal viene dado por el primer gran bloque desprendido del techo de 4.15 m de largo y 2.35 m de alto. Una cara plana del mismo ha quedado expuesta en el pequeño recinto a izquierda de la galería. Sobre ella y aprovechando las ondulaciones del límite superior del bloque, se han trazado dos bisontes pintados en rojo y orientados a izquierda. En el interior de uno de ellos se reconocen vestigios de una cabeza de caballo (Garete Maidagan, Garaizar Rios, & Ruiz Redondo, 2013).



**Figura 4:** Planimetría de la Cueva de Lumentxa, en línea roja la localización del panel de los bisontes. La flecha negra indica la entrada actual de la cueva (Garete Maidagan *et al.*, 2013).

## 4. Metodología empleada

Para obtener las réplicas virtuales se siguió la misma metodología de trabajo en las tres cuevas, adaptando en cada una de ellas el proceso debido a las diferencias de iluminación, extensión, altura y formaciones.

### 4.1. Levantamiento topográfico de apoyo

Para dar escala y orientación al proyecto se realizó un levantamiento topográfico de apoyo (Fig. 5) mediante un sistema global de navegación por satélite (GNSS) Leica Viva GNSS Receptor GS08 plus y estación total Leica TS11, estableciendo una red de bases en el exterior de la cueva mediante GNSS con una cobertura adecuada de satélites. Desde esas bases se inicia el levantamiento topográfico hacia el interior de la cueva, realizando una poligonal a lo largo del eje longitudinal de la cueva, mediante lectura con miniprisma. Desde las bases de la poligonal se radiaron una serie de puntos de apoyo materializados en pequeñas dianas colocadas en lugares específicos garantizando el mínimo impacto en las cuevas. El levantamiento topográfico se realizó en el sistema geodésico de referencia ETRS89 y la proyección UTM huso 30 y alturas ortométricas. La precisión realtiva en coordenadas del levantamiento está en torno a  $\pm 5$  mm.



Figura 5: Equipo realizando el levantamiento topográfico de la cueva Venta Laperra

### 4.2. Gestión del color: la evaluación colorimétrica y tonal

Simultáneamente al levantamiento fotogramétrico se llevó a cabo un registro de color utilizando la carta de color Colorchecker de X-Rite.

El flujo de trabajo a seguir se basa en el uso de perfiles de cámara durante el revelado crudo (*raw*) para el ajuste cromático y una curva tonal para el ajuste acromático. En este proceso no intervienen los perfiles ICC de entrada pero la precisión colorimétrica puede ser equivalente o superior.

En el caso de los paneles con pintura o grabado, se realizó un levantamiento fotogramétrico bajo una misma iluminación indirecta no polarizada mediante fuentes de luz distribuidas de forma que permitan iluminar de la forma más uniforme posible la totalidad del panel. Para efectuar el registro del color se fotografió la carta de color bajo las condiciones de iluminación utilizadas.

A partir de la imagen en formato RAW se creó un perfil de cámara y se realizó un ajuste tonal. Los perfiles de cámara están destinados a modificar los aspectos cromáticos de la imagen, ya que no es frecuente que

incorporen curvas de tono. Esencialmente, intervienen en los aspectos de tinte o matiz de esta, lo cual, a menudo, es insuficiente para una buena precisión colorimétrica. Esto es debido a la necesidad de realizar una revisión de la reproducción tonal de la escena mediante los ajustes oportunos, a través de la curva de tono de nuestro revelador. Con frecuencia, durante el proceso de revelado crudo es habitual encontrar pequeños errores de exposición que condicionan, drásticamente, la reproducción tonal que, junto a los perfiles de cámara, contribuya a la precisión de la escena. Por ello, es conveniente realizar evaluaciones de la reproducción tanto cromática como tonal (Pereira Uzal, 2013).

La evaluación de la calidad de la imagen es indispensable para asegurar la rigurosidad del registro del color y la fidelidad de su reproducción, yendo más allá de la subjetividad de una inspección visual.

Los resultados de la evaluación de los ajustes de color realizados para cada uno de los paneles constan de dos partes: en la primera parte (Fig. 6), se refleja la valoración de precisión colorimétrica sobre la carta de color Colorchecker en términos de delta E ( $\Delta E$ ), que permite tener una percepción sobre el error cometido durante los procesos de diseño de los perfiles de cámara.

PANEL AV	Results			References			dC	dH	CIE76	CIE00
	L	a	b	L	a	b				
A1	41.18	14	12	37.99	13.56	14.06	1.09	1.80	3.82	3.24
A2	67.45	20	15	65.71	18.13	17.81	0.41	3.35	3.80	3.05
A3	54.51	-5	-22	49.93	-4.88	-21.92	0.10	0.00	4.58	4.52
A4	44.31	-11	20	43.14	-13.09	21.91	2.69	0.90	3.07	1.88
A5	58.04	8	-27	55.11	8.84	-25.40	1.27	1.29	3.44	3.13
A6	73.33	-33	-1	70.72	-33.40	-0.20	0.38	0.80	2.76	2.05
B1	62.75	38	52	62.66	36.07	57.10	3.13	4.46	5.45	2.86
B2	41.18	9	-45	40.02	10.41	-45.96	1.24	1.17	2.06	1.20
B3	54.90	48	14	51.12	48.24	16.25	0.90	2.07	4.40	3.88
B4	31.37	23	-21	30.33	22.98	-21.59	0.39	0.44	1.20	0.89
B5	73.73	-22	57	72.53	-23.71	57.26	0.87	1.49	2.10	1.22
B6	72.16	23	68	71.94	19.36	67.86	1.21	3.44	3.65	2.14
C1	28.63	13	-53	28.78	14.18	-50.30	2.31	1.83	2.95	1.97
C2	56.86	-36	31	55.26	-38.34	31.37	2.03	1.22	2.86	1.73
C3	47.45	53	25	42.10	53.38	28.19	1.76	2.69	6.24	5.30
C4	82.35	8	84	81.73	4.04	79.82	4.46	3.64	5.79	2.35
C5	54.12	56	-15	51.94	49.99	-14.57	5.90	1.23	6.41	2.78
C6	53.73	-29	-29	51.04	-28.63	-28.64	0.51	0.16	2.74	2.65
D1	96.86	0	3	96.54	-0.42	1.19	1.74	0.66	1.89	1.79
D2	81.57	0	-1	81.26	-0.64	-0.33	0.28	0.87	0.97	1.16
D3	67.06	0	-2	66.77	-0.73	-0.50	1.11	1.24	1.69	1.80
D4	50.98	0	-1	50.87	-0.15	-0.27	0.69	0.27	0.75	0.75
D5	35.69	0	-2	35.66	-0.42	-1.23	0.70	0.53	0.88	0.95
D6	19.61	1	-1	20.46	-0.08	-0.97	0.43	1.00	1.38	1.69
Average							1.48	1.52	3.12	2.29

Figura 6: Resultados extraídos de la valoración de precisión colorimétrica sobre la carta de color Colorchecker en términos de  $\Delta E$  que permite tener una percepción sobre el error cometido durante los procesos de diseño de los perfiles de cámara.

En la segunda parte (Fig. 7), aparece la valoración tonal que refleja los aspectos de reproducción tonal en función de la escala densitométrica de la propia Colorchecker, evaluando el ajuste tonal realizado durante el revelado crudo.

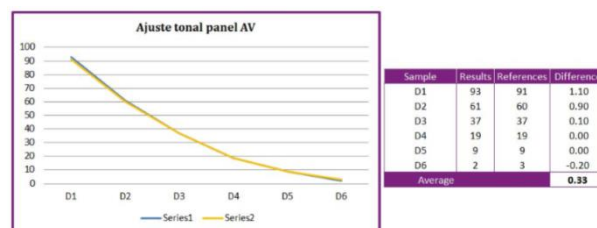


Figura 7: Resultados con la valoración tonal de uno de los paneles con pintura que refleja los aspectos de reproducción tonal en función de la escala densitométrica de la propia Colorchecker, evaluando el ajuste tonal realizado durante el revelado crudo.

La naturalidad es el grado de correspondencia entre la imagen y el recuerdo que el usuario pueda tener de dicha escena u objeto, por lo que estamos ante una experiencia subjetiva. La fidelidad de una imagen se entiende como el grado de correspondencia con la escena u objetos originales. Es, por tanto, una evaluación objetiva, donde las experiencias o la utilidad particular no debe ser una premisa (Pereira Uzal, 2013).

Todos los resultados obtenidos se encuentran dentro de los umbrales de tolerancia establecidos por la norma ISO 12647-2.

Al conjunto de imágenes realizadas para el levantamiento fotogramétrico de cada uno de los paneles bajo estas mismas condiciones, se les asocia su correspondiente ajuste cromático y tonal. De tal manera que el mapa de textura de la réplica virtual obtenida conserva esta gestión de color verdadero.

En el caso de las fotografías correspondientes a los levantamientos fotogramétricos de la totalidad de las cuevas, también es necesario realizar un ajuste de color ya que, durante el trabajo de campo, no se ilumina simultáneamente la totalidad de la cueva, se ilumina la zona en la que se está fotografiando y la configuración utilizada se va replicando hasta completar el levantamiento fotogramétrico. Se consigue así un homogeneizar las texturas que permite lograr un aspecto final del modelo tridimensional de las cuevas aparente y natural.

#### 4.3. Obtención de las réplicas virtuales.

La digitalización 3D se realizó exclusivamente mediante técnicas fotogramétricas, siguiendo la metodología desarrollada por Dogram que requiere la toma exhaustiva de fotografías desde ángulos diferentes por métodos de fotogrametría convergente de objeto

cercano. Se utilizaron cámaras digitales de alta resolución con ópticas de focal fija y calibrada, de 20 y 24 mm en función del espacio de trabajo, y garantizando siempre un tamaño de pixel de 2 mm en la totalidad de las cuevas y de 0.2 mm en las zonas de pintura y grabado. Para la toma de fotografías es indispensable el estudio previo de la iluminación (Fig. 8) en campo. Esta tarea es una de las más laboriosas ya que no es factible iluminar toda la cueva de forma simultánea y las diferencias entre las distintas iluminaciones parciales han de ser prácticamente inexistentes. Se utilizaron paneles led de potencia regulable, flashes y accesorios como medidores de la intensidad de la luz, la carta de color, reflectores, etc.

La totalidad del trabajo de campo se llevó a cabo durante cinco jornadas para cada una de las cuevas. Durante el mismo se instaló también una estación de trabajo portátil para realizar un pre-procesado in situ del levantamiento fotogramétrico.



Figura 8: Equipo durante el estudio de la iluminación de la Cueva de Askondo.



Figura 9: Renderizado de la réplica virtual de la cueva Lumentxa (Dogram, 2015). Vista con la entrada al fondo; en rojo el detalle de la Figura 10.

A partir de la información fotogramétrica registrada en campo se procede en gabinete a realizar la restitución 3D de cada cueva y cada panel con pintura o grabado utilizando métodos de SfM (*Structure from Motion*) (Jancosek & Pajdla, 2011) y de PMVS (*Patch-based Multi-View Stereo*) (Furukawa & Ponce, 2010). La restitución y obtención de cada una de las réplicas virtuales requiere de estaciones de trabajo con gran capacidad de procesamiento. En concreto, se emplearon tres estaciones de procesador Intel Core i5-6400 2.7GHz, 16 GB RAM y SSD de 120 Gb, tarjeta gráfica Gigabyte GeForce GTX 1070 WF OC 8GB.

Estos métodos permiten obtener una réplica virtual con un gran detalle en geometría y apariencia colorimétrica (Fig. 9) minimizando las zonas de sombra y en la que cada triángulo de la malla contiene la información de color y píxeles reales, generando mapas por proyección fotogramétrica de múltiples imágenes (Fig. 10). La orientación externa de las restituciones tridimensionales en el sistema geodésico de referencia ETRS89 y la proyección UTM huso 30 y alturas ortométricas se realizó mediante el marcado de los puntos de apoyo del levantamiento topográfico por fotogrametría y realizando la transformación y el ajuste por mínimos cuadrados entre ambos sistemas.



Figura 10: Renderizado de la réplica virtual de la cueva Lumentxa con apreciación de 1.2 mm/pix (4K).

## 5. Resultados

Se realizó una réplica virtual reproduciendo la totalidad del área de estudio de cada una de las cuevas. Las características geométricas de los resultados aparecen en la Tabla 1. Además, para cada panel de pintura o grabado se obtuvo una réplica virtual con mayor nivel de detalle (Tabla 2).

A continuación se presenta el resultado para uno de los paneles de la cueva Venta Laperra (Fig. 11). Se trata de un grabado de cuarto de bisonte apoyado en los cuartos traseros mirando hacia la entrada de la cueva. Se asienta en un trozo de panel de superficie ondulada. Dos grietas se cortan perpendicularmente en el centro del animal: una de ellas provoca discontinuidad en la línea de la nalga. Del animal se ha representado la línea dorsal, señalando con claridad el abultamiento de la giba; la cola, levantada y vuelta hacia la parte trasera del animal, la

nalga, y el arranque del corvejón y de la pata, así como parte de la línea ventral.

A partir de cada réplica virtual obtenida en coordenadas UTM ETRS 89, se extrajo documentación planimétrica (Fig. 12) complementaria en forma de ortofotografías alzado-sección, ortofotografías de suelos a escala 1:10, cartografías de los suelos y los techos mediante curvas de nivel, cartografías de alturas mediante mapas de colores y cartografías de montera-techo obtenida por comparación de las réplicas con el Modelo Digital del Terreno (MDT) con paso de malla de 5 m del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Tabla 1: Resultados de la réplica virtual de cada cueva.

Cueva	Venta Laperra	Askondo	Lumentxa
Puntos de apoyo	40	15	40
Fotografías	1901	1825	3258
Número de polígonos	17,300,000	9,700,000	19,600,000
Tamaño promedio polígonos	0.010 m	0.010 m	0.020 m
Precisión métrica	0.004 m	0.010 m	0.005 m
Tamaño de pixel	0.002 m	<0.002 m	0.002 m

Tabla 2: Resultados promedio obtenidos en cada cueva para la réplica virtual de los paneles.

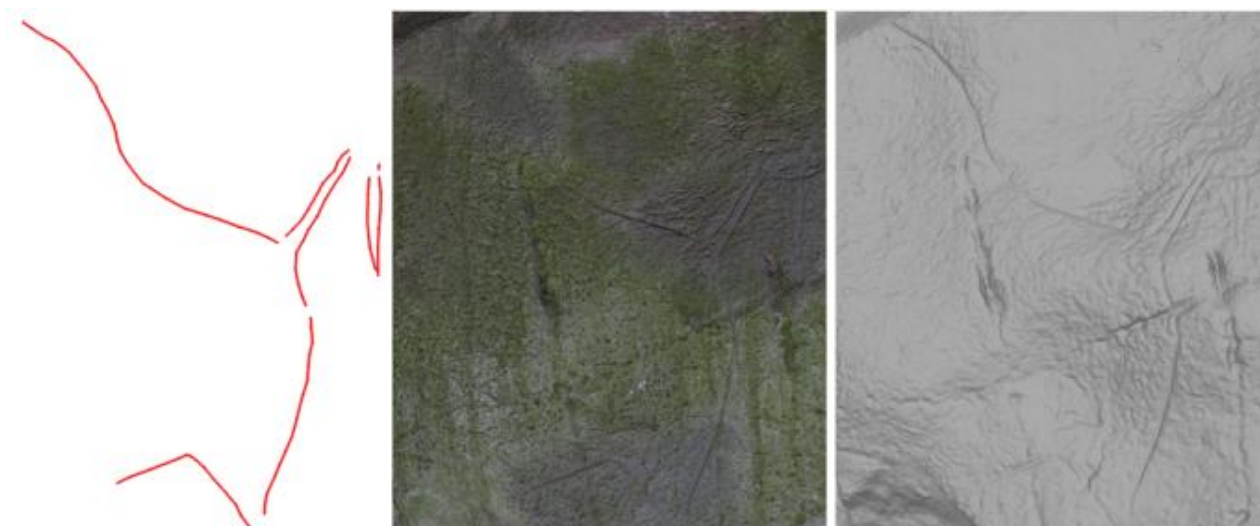
Cueva	Venta Laperra	Askondo	Lumentxa
Puntos de apoyo	4	5	4
Fotografías	20	100	59
Número de polígonos	2,600,000	2,400,000	3,000,000
Tamaño promedio polígonos	0.001 m	0.002 m	0.002 m
Precisión métrica	0.001 m	0.001 m	0.001 m
Tamaño de pixel	<0.050 mm	<0.200 mm	<0.200 mm

## 6. Conclusiones

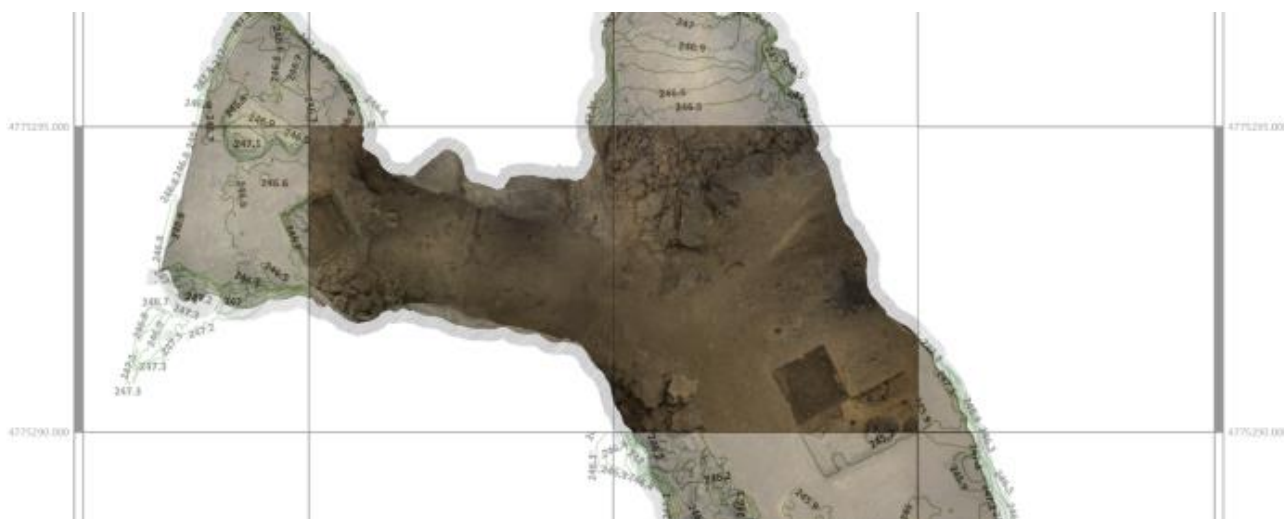
La compleja morfología de las cavidades, la finura de sus grabados y la poca nitidez de sus pinturas suponían dificultades técnicas para lograr la reproducción fiel de su geometría y apariencia.

Esta metodología ha demostrado la capacidad de solventar estas dificultades, obteniendo réplicas virtuales completas y con el nivel de detalle adecuado para su estudio y difusión.

Favorece además el modelo de gestión de cuevas implantado por la Diputación Foral de Bizkaia, cumpliendo sus premisas iniciales, mejorando los resultados obtenidos y aumentando su sostenibilidad.



**Figura 11:** Imágenes extraídas de la réplica virtual de la cueva Venta Laperra.



**Figura 12:** Superposición de la ortofotografía del suelo y el mapa de curvas de nivel en el sistema de coordenadas UTM ETRS 89. Datos extraídos de la réplica virtual de la cueva de Askondo.

En cuanto al desarrollo de la tecnología, hasta el momento las técnicas empleadas eran la combinación del escaneado láser y de la fotogrametría (Barrera Mayo & Baeza Santamaría, 2010). La calidad del resultado presentado en este artículo y el uso de una única tecnología hace que esta metodología sienta un precedente en la documentación gráfica de cuevas

y en la divulgación de las mismas. En este último aspecto, se abre además un gran abanico de posibilidades gracias a la fidelidad de la representación: gran inmersión, interacción, gamificación y adaptación a diferentes plataformas de visualización.

## Referencias

- Barrera Mayo, S. (2008). La tecnología de realidad virtual al servicio de la comunicación y difusión de la Cueva de Santimamiñe. *Revista e-rph*, 3. Retrieved 19 April 2017, from <http://www.revistadepatrimonio.es/revistas/numero3/difusion/experiencias/articulo.php>
- Barrera Mayo, S., & Baeza Santamaría, U. (2010). La realidad virtual aplicada a la explotación sostenible del patrimonio arqueológico. Un caso éxito: la Cueva de Santimamiñe. *Virtual Archaeology Review*, 1(1), 69–72. doi:10.4995/var.2010.4775
- Cabrelles López, M., & Lerma García, J. L. (2015). Documentación 3D de abrigos rupestres a partir de láser escáner y de procesos fotogramétricos automatizados. *Virtual Archaeology Review*, 4(8), 64–68. doi:10.4995/var.2013.4320
- Cachero, R., & Abello, C. (2015). Stereo-photometric techniques for scanning micrometer scale. *Virtual Archaeology Review*, 6(13), 72–76. doi:10.4995/var.2015.4380



- Cano, P., Lamolda, F., Torres, J. C., & Villafranca, M. del M. (2010). Uso de escáner láser 3D para el registro del estado previo a la intervención de la Fuente de los Leones de La Alhambra. *Virtual Archaeology Review*, 1(2), 89–94. doi:10.4995/var.2010.4695
- Dogram, Ingeniería de documentación tridimensional. (2015). *Levantamiento 3D Cueva de Lumentxa*. Retrieved 7 February 2017, from <https://www.youtube.com/watch?v=XZpwoYPLecM>
- Eltner, A., & Schneider, D. (2015). Analysis of different methods for 3D reconstruction of natural surfaces from parallel-axes UAV images. *The Photogrammetric Record*, 30(151), 279–299. doi:10.1111/phor.12115
- Furukawa, Y., & Ponce, J. (2010). Accurate, dense, and robust multi-view stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(8), 1362–1376. doi:10.1109/TPAMI.2009.161
- Garate Maidagan, D., & Rios Garaizar, J. (2012). El arte parietal paleolítico de la cueva de Askondo (Mañaria, Bizkaia). *Kobie Serie Bizkaiko Arkeologi Indusketak - Excavaciones Arqueológicas en Bizkaia*, (2), 99–142. Retrieved 10 February 2017, from [http://www.bizkaia.eus/fitxategiak/04/ondarea/Kobie/PDF/7/Kobie\\_BAI\\_02\\_web.pdf](http://www.bizkaia.eus/fitxategiak/04/ondarea/Kobie/PDF/7/Kobie_BAI_02_web.pdf)
- Garete Maidagan, D., Garaizar Rios, J., & Ruiz Redondo, A. (2013). El arte parietal paleolítico de la cueva de Lumentxa (Lekeitio, Bizkaia). *Kobie Serie Paleoantropología*, 32, 5–28. Retrieved 10 February 2017, from [https://www.researchgate.net/publication/262687249\\_El\\_arte\\_parietal\\_paleolitico\\_de\\_la\\_cueva\\_de\\_Lumentxa\\_Lekeitio\\_Bizkaia](https://www.researchgate.net/publication/262687249_El_arte_parietal_paleolitico_de_la_cueva_de_Lumentxa_Lekeitio_Bizkaia)
- Gorrotxategi Anieto, X. (2000). El santuario exterior con grabados de Benta Laperra (Karrantza, Enkarterri, Bizkaia). *Kobie, Arte Paleolítico Parietal de Bizkaia*, 121–151.
- Jancosek, M., & Pajdla, T. (2011). Multi-view reconstruction preserving weakly-supported surfaces. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (pp. 3121–3128). Colorado Springs, CO, USA doi:10.1109/CVPR.2011.5995693
- Lasheras, J. A., De, C., Heras, L., & Prada, A. (2015). La conservación de Altamira como parte de su gestión. In *XIX International Rock Art Conference (IFRAO)*. Retrieved 10 March 2017, from [http://museodealtamira.mcu.es/web/docs/PrehistoriayArte/La\\_conservacion\\_de\\_Altamira\\_como\\_parte\\_de\\_su\\_gestion.pdf](http://museodealtamira.mcu.es/web/docs/PrehistoriayArte/La_conservacion_de_Altamira_como_parte_de_su_gestion.pdf)
- Lerma García, J. L., Cabrelles López, M., Navarro Tarín, S., & Galcerá Ustero, S. (2010). Documentación 3D y visualización multimedia de la Cova del Parpalló (Gandia). *Virtual Archaeology Review*, 1(2), 123–127. doi:10.4995/var.2010.4701
- Majid, Z., Ariff, M. F. M., Idris, K. M., Yusoff, A. R., Idris, K. M., Aspuri, A., ... Ardi, R. (2017). Three-dimensional mapping of an ancient cave paintings using close-range photogrammetry and terrestrial laser scanning technologies. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42(2W3), 453–457. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-453-2017
- Pereira Uzal, J. M. (2013). *Gestión del color en proyectos de digitalización : fundamentos y estrategias para la fidelidad del color*. Marcombo. Retrieved 10 March 2017, from <http://www.jpereira.net/gestion-del-color-en-proyectos-de-digitalizacion>
- Rios Garaizar, J., Garate Maidagan, D., & Regalado Bueno, E. (2012). Excavación arqueológica de la cueva de Askondo (Mañaria, Askondo). *Kobie Serie Bizkaiko Arkeologi Indusketak - Excavaciones Arqueológicas en Bizkaia*, (2), 31–38. Retrieved 10 March 2017, from [http://www.bizkaia.eus/fitxategiak/04/ondarea/Kobie/PDF/7/Kobie\\_BAI\\_02\\_web.pdf](http://www.bizkaia.eus/fitxategiak/04/ondarea/Kobie/PDF/7/Kobie_BAI_02_web.pdf)
- Ruiz, J. F., & Pereira, J. (2014). The colours of rock art. Analysis of colour recording and communication systems in rock art research. *Journal of Archaeological Science*, 50, 338–349. doi:10.1016/j.jas.2014.06.023