

TELEDETECCIÓN HIPERESPECTRAL

Herramienta fundamental para el estudio, documentación y conservación del arte rupestre

VICENTE BAYARRI¹. MIGUEL A. SEBASTIÁN². SERGIO RIPOLL³.

¹ Director de I+D+i de GIM Geomatics.

² Dpto Ingeniería de Construcción y Fabricación. ETSII UNED

³ Dpto. Prehistoria y Arqueología.Facultad de Geografía e Historia UNED

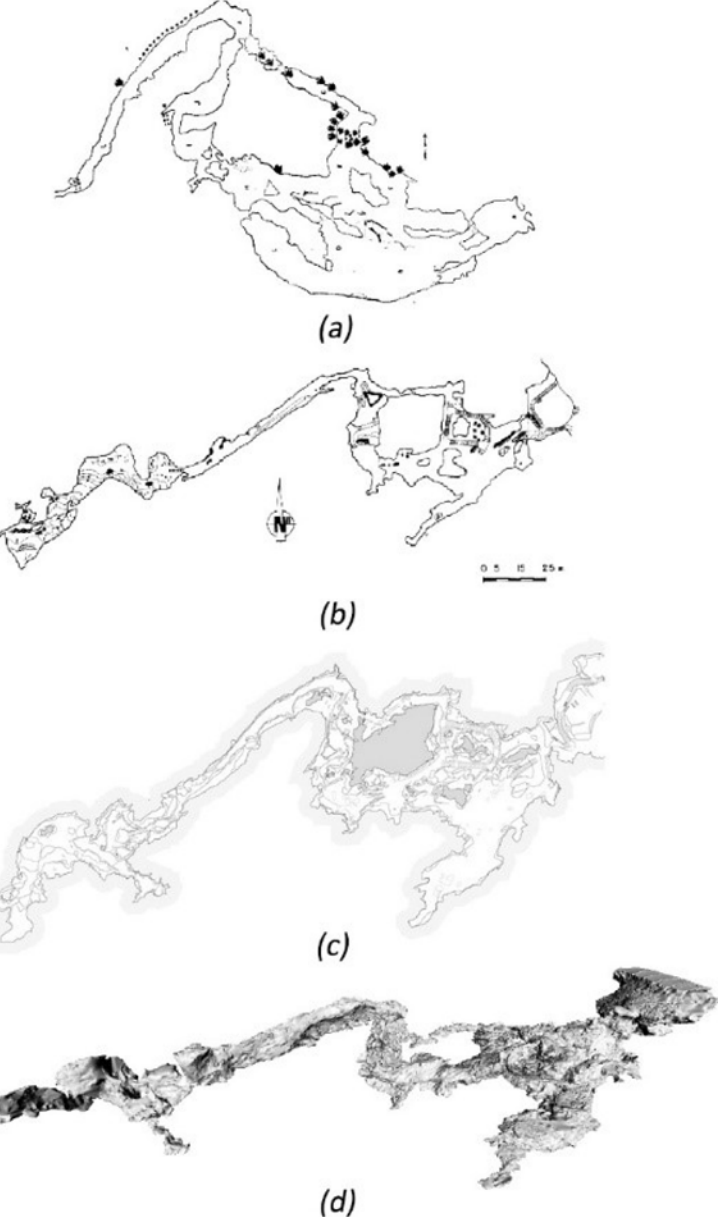
La teledetección hiperespectral hace uso de imágenes dentro de rangos de longitud de onda del espectro electromagnético, en los que el ojo humano o las cámaras fotográficas convencionales no son sensibles (ultravioleta e infrarrojo). Este trabajo presenta varias técnicas que emplean esta tecnología para el estudio, la conservación y la gestión del arte rupestre. Tareas como el reconocimiento de la materia colorante, el reconocimiento formal de las figuras, la superposición de formas y la documentación del estado de conservación pueden resolverse eficazmente con ellas.

El Arte Prehistórico es una manifestación extraordinaria que ha documentado con gran detalle y precisión algunos hechos y especies animales que coexistieron con los humanos de tiempos paleolíticos. Se suele situar en abrigos y cuevas y normalmente está constituido por pinturas, dibujos, gra-

bados, impresiones, tallas en bajo relieve y figuras.

Dicho arte está en peligro debido a las presiones del desarrollo, el grafiti, vandalismo, la mala gestión del turismo y los impactos naturales.

El trabajo surge ante la necesidad de crear un sistema de documentación



La cueva de El Castillo es un yacimiento arqueológico encuadrado dentro del complejo cuevas del Monte Castillo, en Puente Viesgo (Cantabria, España).

Está incluida en la lista del Patrimonio de la Humanidad de la Unesco desde julio de 2008, dentro del sitio “Cave of Altamira and Paleolithic Cave Art of Northern Spain” (Cueva de Altamira y arte rupestre paleolítico del Norte de España)

En la figura a la izquierda se presenta:

a) Plano en planta de la cueva de El Castillo que figura en Les cavernes de la Région Cantabrique de 1911 (Alcalde del Río, et.al, 1911)

b) Plano del Espeleo club de Gràcia de 1982 (Espeleo Club de Gràcia, 1982)

c) Plano en planta de la cueva de El Castillo actual

d) Modelo 3D actual de la cueva

del arte y seguimiento del estado de conservación de alta precisión geométrica y temática lo más sostenible y con el menor impacto sobre los frágiles ecosistemas en los que se encuentra.

El estudio se ha centrado en la cueva de El Castillo, descubierta por Hermilio Alcalde del Río en 1903, la cual presenta una gran diversidad del arte rupestre del Paleolítico Superior, con gran cantidad de

figuras de animales y un gran número de signos. Su valor es excepcional, siendo una de las concentraciones de Arte Rupestre Paleolítico más importante conocida hasta el día de hoy. En julio de 2008 la Unesco declaró esta cueva Patrimonio de la Humanidad dentro del sitio «La Cueva de Altamira y arte rupestre paleolítico de la Cornisa Cantábrica” (en inglés, Cave of Altamira and Paleolithic Cave Art of Northern Spain).



Integración de técnicas geomáticas para la georreferenciación de datos hiperespectrales. Sistema Global de Navegación por Satélite (GPS), Estación total, Láser Escáner 3D y dispositivo fotogramétrico.

El método planteado se ha ensayado en una serie de paneles estudiados en varias ocasiones desde su descubrimiento. Los paneles presentan una serie de casuísticas complejas de resolver tales como la superposición de pinturas, veladuras calcíticas, combinación pigmento-grabado, etc. Junto con la necesidad de caracterización y control del biodeterioro a lo largo del tiempo.

Los métodos topográficos tradicionales tenían como objetivo el dibujo final de una planta, un perfil longitudinal y algunas secciones. La integración de herramientas geomáticas tradicionales como los sistemas globales de navegación por satélite y la estación topográfica total con otras más recientes como los láser escáner 3D, permite realizar un registro rápido, de precisión y fiable de elementos complejos con el

objetivo de poder llegar a derivar una documentación exhaustiva que abarca desde los planos en planta, curvas de nivel 2.5D/3D, secciones longitudinales y transversales; análisis tridimensionales como cálculo de alturas de galerías, monteras, documentación del karst y hasta sistemas de realidad virtual.

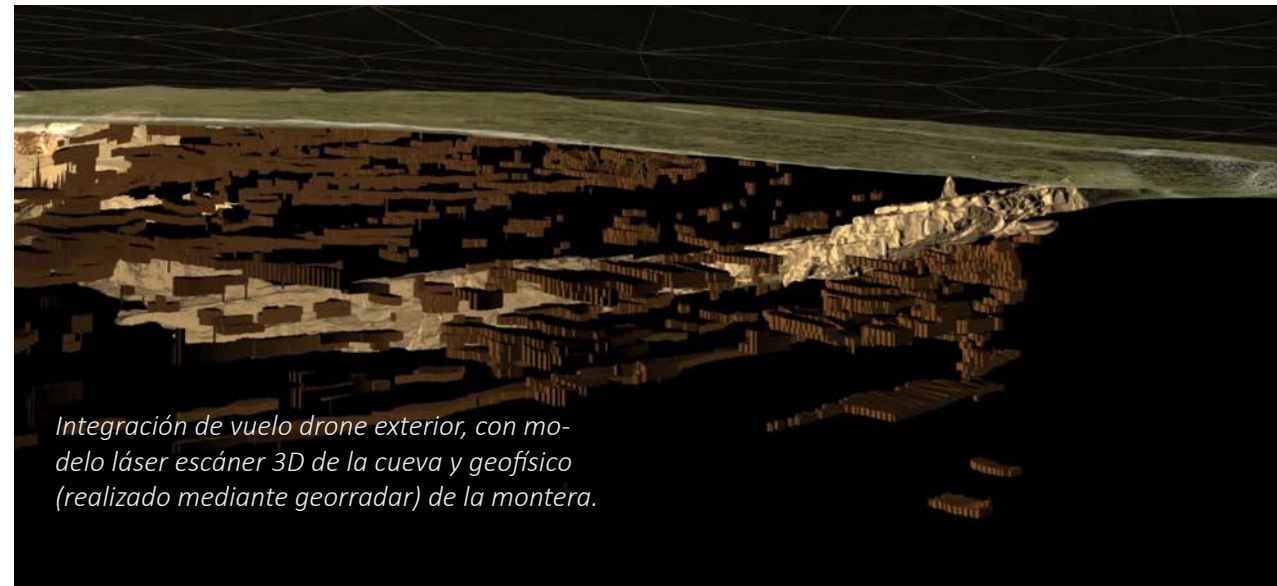
Disponer de una base cartográfica precisa es importante a la hora de volcar la información capturada, interrelacionar parámetros y llevar a cabo una gestión eficaz de la misma; si bien ésta se puede convertir en fundamental a la hora de elaborar y testear modelos de predicción basados en el conocimiento como los hidroquímicos, microbiológicos, climáticos, geotécnicos o de fauna los cuales requieren medir múltiples parámetros, y muchos de ellos altamente correlacionados.

La integración de técnicas geofísicas como el georradar sobre el modelo 3D para el cartografiado en 3D del subsuelo del complejo kárstico permite analizar y cartografiar el sistema de fracturación interna de la montera, evaluación de humedades en el subsuelo y correlacionar los datos con la estratigrafía.

Esta técnica combinada hace más sostenible la documentación de cuevas, ya que permite:

- Reducción de la permanencia en la cueva, reduciendo el impacto sobre ella.
- Evitar el uso de elementos de puntería, lo que conlleva una mejor conservación de la cueva
- Aumentar la precisión de los puntos de apoyo: 2 mm de un punto frente a los 5-7 mm de los sistemas de medición sin prisma de las Estaciones Topográficas Totales.
- Disponer de puntos de control por todos los paneles para analizar las desviaciones respecto al modelo fotogramétrico.

El vocablo teledetección deriva del francés télédétection y fue traducido en 1967 al término anglosajón Remote Sensing o percepción remota y se puede definir como registro de información de un objeto sin entrar en contacto material con él en las regiones del ultravioleta, visible, infrarrojo y microondas. Un sistema de Teledetección se caracteriza fundamentalmente porque la radiación electromagnética interacciona con la superficie objeto de estudio, sufriendo procesos de reflexión, absorción y transmisión, y la fracción re-



Integración de vuelo drone exterior, con modelo láser escáner 3D de la cueva y geofísico (realizado mediante georradar) de la montera.

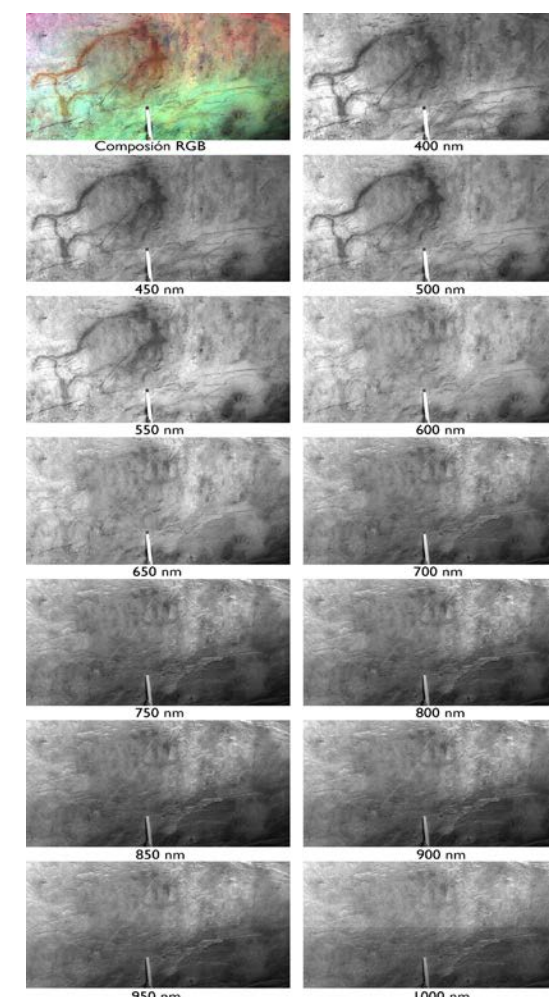
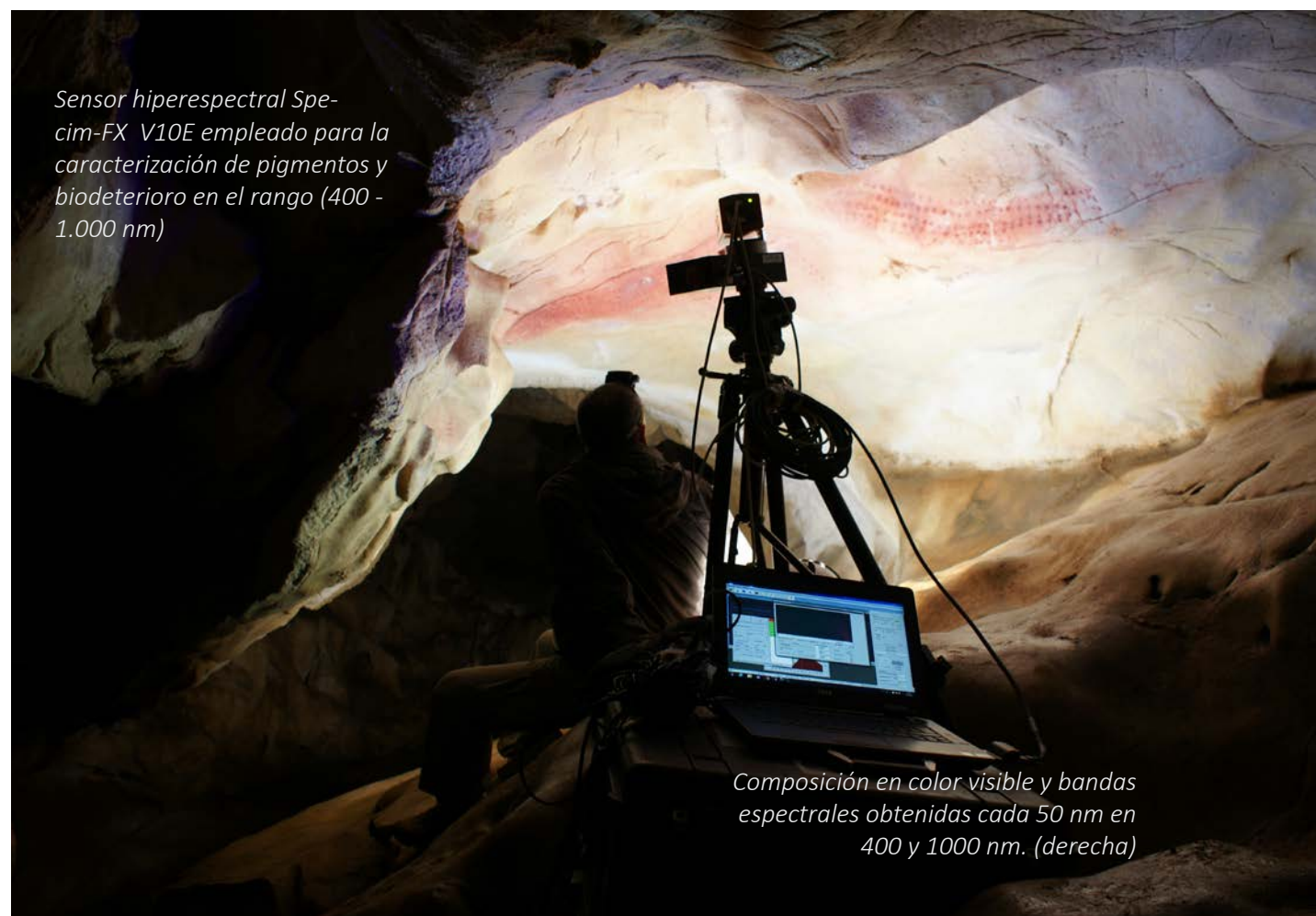


¿En qué consiste esta técnica? Si realizamos una foto con la cámara convencional, obtendremos datos por tres canales (rojo verde y azul). Con la técnica hiperspectral se logran datos de unos 200 canales. Esto es debido a que mientras el ultravioleta se queda en la superficie, la radiación infrarroja penetra en la pared y llega a detectar lo que hay detrás de una mancha de pintura, de un grabado, de un hollín y de la propia cal-cita depositada a lo largo en milenios.

flejada es recogida y medida por el sensor, tras haber sido modificada en mayor o menor medida por la atmósfera interpuesta entre la superficie y la plataforma de teledetección.

Las paredes y suelos de las cuevas responden de una forma específica a la radiación de la luz. Este diferente comportamiento a la radiación nos permite, mediante el análisis del balance de energía reflejada al sensor, diferenciar la naturaleza y los componentes de la superficie. Las superficies de las cuevas las podemos clasificar grosso modo en cuatro grandes grupos: elementos vivos (hongos y bacterias), paramento (tipo de sustrato), pigmento (si lo hubiera) y agua.

Cuando incide la radiación de luz sobre cualquier tipo de superficie, una parte de ella es reflejada, otra es absorbida y el resto es transmitida a su través. La forma más sencilla de cuantificar la respuesta espectral de una superficie es mediante una representación bivariada, de la variable de la longitud de onda de la radiación reflejada y el porcentaje de reflexión. La respuesta es una curva que recibe el nombre de curva de reflectividad de la superficie, también llamada firma espectral. La firma varía en función de las propiedades físico-químicas que presenta la superficie, esto es composición química como por ejemplo la materia orgánica y óxido de hierro, la textura que determina la capacidad de retención del agua, el contenido de humedad y la rugosidad.



En un panel con arte rupestre, la existencia de hongos y bacterias, el contenido de materia orgánica, carbón y de óxido de hierro o manganeso son los principales agentes que influyen en la curva de reflectividad de un paramento en el rango del visible, y le dotan de su color característico.

La información obtenida mediante sensores hiperspectrales, ha de ser procesada cuidadosamente para poder obtener resultados útiles para el fin propuesto. Disponer una metodología para la documentación del arte



rupestre es esencial para poder adquirir conocimientos para avanzar en la comprensión del patrimonio cultural, sus valores y su evolución; promover el interés y la participación de las personas en la preservación del patrimonio mediante la difusión de la información registrada, permitir la gestión sostenible del bien y el control del biodeterioro.

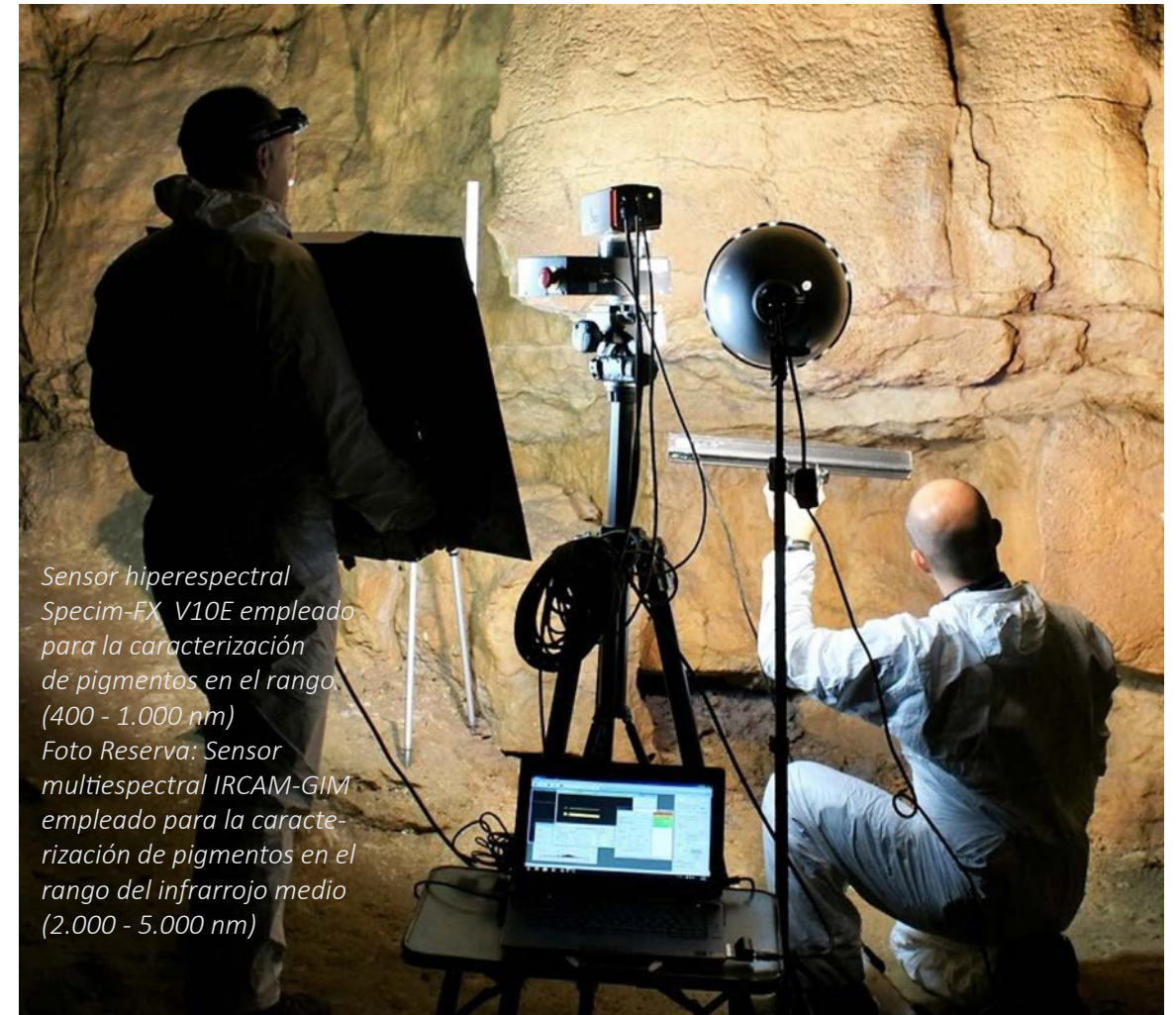
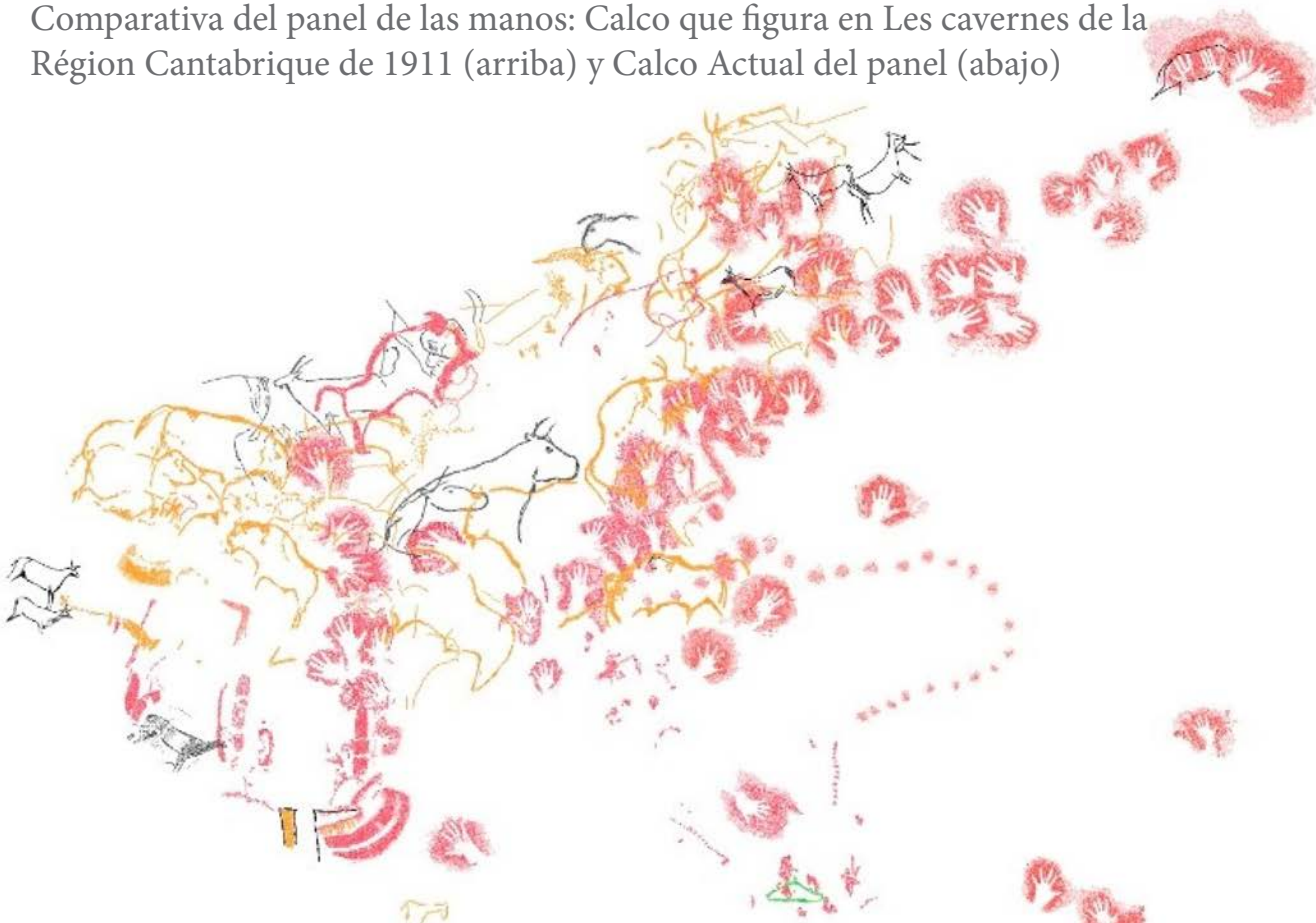
La revisión de los tres paneles ha producido un considerable aumento en el número en las figuras conocidas. En el panel de las manos se ha pasado de 55 a 97 elementos (+76%), en el panel de polícromos de 15 a 37 (+ 47%) y en el panel del tectiforme de 1 a 7 (+600%). Si se analiza respecto al estudio de manos realizado (Proyecto Handpas, 2018), se ha pasado de 40 a 56 manos, esto es un 40% más. Esto hace pensar que una revisión profunda de la cueva podría generar gran cantidad de figuras nuevas.

Hoy en día, las metodologías de registro deberían, siempre que sea posible, emplear técnicas no intrusivas y no causar daños al elemento objeto de registro; además, antes de cualquier registro de dato, habría que establecer claramente el método a emplear en la documentación.

Los ámbitos planteados con alto potencial para el uso de datos hiperspectrales fueron: a) el reconocimiento de la materia colorante; b) el recono-



Comparativa del panel de las manos: Calco que figura en Les cavernes de la Région Cantabrique de 1911 (arriba) y Calco Actual del panel (abajo)



*Sensor hiperspectral Specim-FX V10E empleado para la caracterización de pigmentos en el rango (400 - 1.000 nm)
Foto Reserva: Sensor multiespectral IRCAM-GIM empleado para la caracterización de pigmentos en el rango del infrarrojo medio (2.000 - 5.000 nm)*

cimiento formal de las figuras; c) el reconocimiento del proceso técnico; d) la documentación del estado de conservación y e) biodeterioro.

En cuanto al reconocimiento de la materia colorante. La mayor parte de las técnicas aplicadas al estudio de la composición de la materia colorante implica la toma de muestras, con lo que ello conlleva de acción extractiva y, por tanto, de deterioro del patrimonio ru-

pestre. La lectura de las imágenes trabajadas a diferentes amplitudes espectrales permite diferenciar de manera clara composiciones diferentes de las materias colorantes utilizadas. Se trata de un hito importante en el que sin duda hay que seguir trabajando, ya que hasta ahora se ha logrado diferenciar, de manera relativa, diferentes composiciones, si bien será necesario llevar a cabo más experimentaciones con pig-



*Sensor hiperespectral Specim-FX V10E
empleado para la caracterización de pig-
mentos en el rango (400 - 1.000 nm)*

mentos naturales con el fin de obtener patrones precisos y poder vincular determinados espectros con composiciones mineralógicas precisas.

En cuanto a la reconstrucción de los motivos rupestres, la aplicación de la técnica ha permitido definir con precisión la morfología original de algunas figuras, tanto de motivos grabados como pintados en diferente color (y muy probablemente de diferente composición química). En concreto es posible definir con exactitud los contornos de las figuras, reconocer con precisión

partes anatómicas o áreas de figuras concretas y, en consecuencia, obtener imágenes que suponen la reconstrucción altamente fidedigna de la pintura o el grabado original.

En cuanto al reconocimiento del proceso técnico y las superposiciones entre figuras. En los estudios de arte rupestre, y condicionada por el estado de conservación de las figuras, la lectura de superposiciones entre trazos o figuras es uno de los problemas fundamentales. El sistema empleado

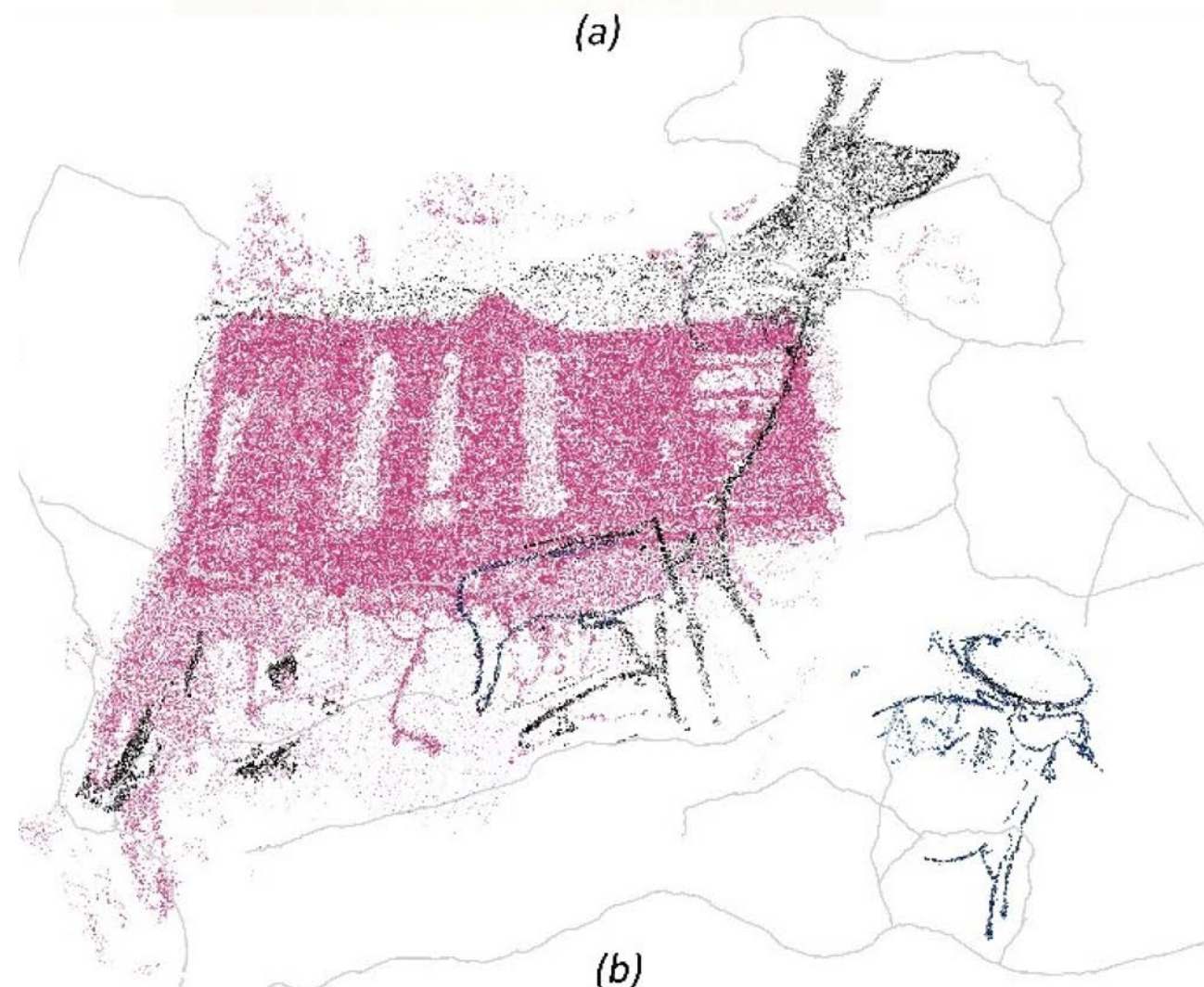
Comparativa del símbolo del túnel:

a) Calco que figura en Les cavernes de la Région Cantabrique de 1911 (Alcalde del Río, et.al, 1911)

b) Calco Actual del panel.



(a)



(b)

Vicente Bayarri Cayón



El presente trabajo muestra los principales contenidos y resultados de la tesis doctoral defendida por Vicente Bayarri Cayón, en mayo de 2020, titulada

“Algoritmos de análisis de imágenes multiespectrales e hiperespectrales para la documentación e interpretación del arte rupestre”, desarrollada en la Escuela Internacional de Doctorado de la UNED (EIDUNED), dentro del Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales de la UNED y dirigida por los doctores Miguel A. Sebastián Pérez y Sergio Ripoll López, siendo fruto de la colaboración de investigadores de los departamentos de Ingeniería de Construcción y Fabricación y de Prehistoria y Arqueología, ambos de la UNED, y de la empresa GIM Geomatics.

ha permitido el reconcomiendo de superposiciones al menos en tres ámbitos: a) entre trazos de una misma figura en aquellos casos en que la composición de materia colorante es diferente, b) entre grabado y pintura, ya que se



Sensor multiespectral IRCAM-GIM empleado para la caracterización de pigmentos en el rango del infrarrojo medio (2.000 - 5.000 nm)

discriminan espectralmente cada una de las acciones técnicas y, en menor grado, c) la superposición entre trazos grabados de una misma figura, lo que permite la reconstrucción con cierta fiabilidad del proceso de ejecución de un motivo.

En cuanto a la caracterización del estado de conservación de los motivos rupestres. La principal herramienta que proporcionan los datos multi e hiperespectrales es la posibilidad de llevar a cabo una documentación exhaustiva de la conservación de un motivo, discriminándose a la perfección zonas veladas, zonas lixiviadas, descamaciones y cualquier otra acción de índole tafonó-

mica a la que se encuentre sometida la figura. En un primer momento, al que ahora ha sido posible llegar, se pueden presentar “mapas” de cada una de las figuras y de los problemas de conservación que lleva asociadas.

En conclusión, se puede apuntar que la aplicación de las tecnologías de teledetección hiperespectral al ámbito de la arqueología, y más en concreto del arte rupestre, presenta un alto potencial con aplicaciones en la documentación, el análisis técnico y la conservación del patrimonio cultural. Es posible ver información no visible al ojo, apareciendo un nuevo arte desconocido hasta el momento a veces en paneles que

se encontraban extrañamente sin decorar. Actualmente la teledetección hiperespectral ya puede ser considerada la evolución natural a los métodos de documentación basados en imágenes RGB y técnicas de realce que se han impuesto desde finales de la década de los 90, así como de otros anteriores como la fotografía analógica, frottages, trazados directos y dibujos a mano que se han venido empleando desde el descubrimiento de la cueva en 1903.

Referencias bibliográficas:

Alcalde Del Río, H.; Breuil, H.; Sierra, L. *Les Cavernes de la Région Cantabrique (Espagne)*; Impr. V.A. Chêne, Monaco, 1911.

Bayarri, V. *Algoritmos de análisis de imágenes multiespectrales e hiperespectrales para la documentación e interpretación del arte rupestre. Doctorado en Tecnologías Industriales, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Mayo 2020. Disponible online: <http://e-spacio.uned.es/fez/view/tesisuned:ED-Pg-TecInd-Vbayarri>*

Bayarri, V.; Sebastián, M.A.; Ripoll, S. *Hyperspectral imaging techniques for the study, conservation and management of rock art. Applied Sciences* 2019, 9, doi:10.3390/app9235011.

Bayarri, V.; Castillo, E.; Ripoll, S.; Sebastián, M.A. *Improved Application of Hyperspectral Analysis to Rock Art Panels from El Castillo Cave (Spain). Applied Sciences* 2021, 11, 1292. <https://doi.org/10.3390/app11031292>