

TESIS DOCTORAL

2020

**ALGORITMOS DE ANÁLISIS DE IMÁGENES
MULTIESPECTRALES E HIPERESPECTRALES PARA LA
DOCUMENTACIÓN E INTERPRETACIÓN DEL ARTE**

RUPESTRE

VICENTE BAYARRI CAYÓN

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

Dr. MIGUEL ÁNGEL SEBASTIÁN PÉREZ

Dr. SERGIO RIPOLL LÓPEZ

ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO DE LA
UNED

PROGRAMA DE DOCTORADO EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

ALGORITMOS DE ANÁLISIS DE IMÁGENES
MULTIESPECTRALES E HIPERESPECTRALES PARA LA
DOCUMENTACIÓN E INTERPRETACIÓN DEL ARTE
RUPESTRE.

VICENTE BAYARRI CAYÓN
INGENIERO EN GEODESIA Y CARTOGRAFÍA

CO-DIRECTORES:
DR. D. MIGUEL ÁNGEL SEBASTIÁN PÉREZ
DR D. SERGIO RIPOLL LÓPEZ

Resumen

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. A menudo, dicho arte se encuentra en cuevas que forman parte de sistemas kársticos, que evolucionan a través del tiempo y además incluyen microhábitats en los que se desarrollan comunidades animales y vegetales. Tradicionalmente se han considerado como algo especial y frágil, y se han tratado de adoptar medidas para garantizar su conservación pese a la presión del turismo.

El factor principal para transmitir el patrimonio cultural a generaciones futuras es una documentación rigurosa y exhaustiva. La presente tesis surge ante la necesidad de crear un sistema de documentación del arte y seguimiento del estado de conservación de alta precisión geométrica y temática lo más sostenible y con el menor impacto sobre tan frágil ecosistema.

Este trabajo analiza, desarrolla e implementa una nueva metodología, una forma de analizar el patrimonio a partir de la integración de diferentes técnicas geomáticas, que va desde la georreferenciación precisa de los datos hasta el uso técnicas de análisis espectral y fotónico que abarca desde la luz, los sensores, datos de calibración y algoritmos de procesado.

El presente estudio muestra una metodología aplicable a cualquier conjunto con arte rupestre que quiera ser estudiado o controlado en el tiempo; cosa que supone una importante contribución a la internacionalización de la ciencia y de la tecnología. El método se ha ensayado en una serie de paneles con arte rupestre, estudiados desde inicios del siglo XX, que presentan una serie de casuísticas complejas de resolver (superposición de pinturas, veladuras calcíticas, combinación pigmento-grabado, etc.) además de para la caracterización y control del biodeterioro a lo largo del tiempo.

Pero este análisis no sólo establece unas buenas prácticas de trabajo a modo de Libro Blanco, sino que además establece la metodología de trabajo en campo, mediante la integración de tecnologías geomáticas y nuevas herramientas de procesamiento de información multiespectral e hiperespectral, en el estudio de pinturas que presentan diferentes patologías.

Abstract

Prehistoric Art is an extraordinary manifestation that has documented with great detail and precision some facts and animal species that coexisted with the humans of Palaeolithic times. Often, this art is found in caves that are part of karst systems, which evolve over time and also include microhabitats in which animal and plant communities develop. Traditionally they have been considered as something special and fragile, and actions have been taken to guarantee their conservation despite the pressure of tourism.

The main factor for transmitting cultural heritage to future generations is rigorous and thorough documentation. This thesis arises from the need to create a system of documentation of the art and monitoring of the state of conservation with high both geometric and thematic accuracy, the most sustainable and with the least impact on such fragile ecosystem.

This work analyses, develops and implements a new methodology, a way of analysing the heritage from the integration of different geomatics techniques, ranging from accurate georeferencing of data to the use of techniques of spectral and photonic analysis that includes light, sensors, calibration data and processing algorithms.

The present work shows a methodology applicable to any set with rock-art that wants to be studied or controlled in time; what is an important contribution to the internationalization of science and technology. The method has been tested in a series of panels with rock-art, studied since the beginning of the 20th century, which present a series of complex case studies (superposition of paintings, calcitic glazes, pigment-engraving combination, etc.) as well as characterization and control of biodeterioration over time.

But this work not only establishes good work practices but also establishes the methodology to work in the field, through the integration of geomatics technologies and new tools of multispectral and hyperspectral information processing, in the study of paints that present different pathologies.

Agradecimientos

Es difícil entender la importancia de los agradecimientos de una tesis doctoral hasta que no se ha terminado. En ese momento te das cuenta de cuánto tienes que agradecer a tanta gente. Intentaré resumir en unas líneas la gratitud que siento a todas las personas que han estado presentes durante esa etapa de más de una década desde su inicio, haciendo posible que hoy deje de ser un sueño para pasar a ser una realidad.

En primer lugar, a Miguel Ángel y Sergio, los directores de la tesis, por toda su ayuda y consejos. Gracias a sus ánimos esta vez ha sido posible culminarla.

A mi familia, a mis abuelos y padres por haberme enseñado que el mundo es para los valientes.

A aquellas personas que han estado presentes en mi camino y, aunque ya no están, han puesto su granito de arena para que hoy sea quién y cómo soy.

A todos los que ocupan un lugar especial en mi vida y que, por la distancia, no he podido ver tanto como me hubiera gustado.

A mis amigos, estoy convencido de que si de algo puedo presumir en esta vida es de los grandes amigos que tengo, lo que me hace sentir una persona muy afortunado. No hace falta que los nombre, ellos saben quiénes son y lo importantes que son para mí y, aunque algunos están lejos, tengo la suerte de poder sentirme siempre acompañado.

A Irene, Aitana y Vicente por ser mi apoyo y estar incondicionalmente siempre a mi lado, en los buenos y malos momentos. Les doy las gracias por todos los esfuerzos que han hecho, por haberme hecho creer cada día que podía ser factible y, principalmente, por hacerme feliz.

También me gustaría agradecerle a mi colega Elena Castillo, por su perseverancia y cabezonería; ha sido una pieza fundamental para que esto haya podido culminarse tras más de diez años de investigaciones.

Y por supuesto, no podría faltar GIM Geomatics por su apoyo incondicional y todas las personas que están, que han pasado o que colaboran con nosotros, al Equipo Norte, los amigos prehistoriadores, La Chusma y el Geomatic Blog. Todos juntos han creado el caldo de cultivo perfecto para que arte rupestre y geomática sea la temática de esta tesis.

Índice

Resumen.....	5
Abstract	6
Agradecimientos	7
Lista de figuras	11
Lista de tablas.....	16
Capítulo 1. Planteamiento general de la investigación.....	17
1.1. Introducción general.....	17
1.2. Justificación.....	19
1.3. Objetivos	22
1.4. Organización de la tesis	23
Capítulo 2: Técnicas de documentación tridimensional e hiperespectral.....	25
2.1.- Georreferenciación de datos y técnicas geomáticas.....	25
2.1.1. Creación del Marco de Referencia	29
2.1.2. Caracterización del Entorno de protección.....	29
2.1.3. Digitalización de las cuevas	31
2.1.4. Preprocesado de la información: Limpieza y registro	32
2.1.5. Procesado: Extracción de información del modelo.....	33
2.1.6. Flujo de trabajo fotogramétrico	39
2.1.7. Geofísica - Georradar.....	42
2.2. La teledetección terrestre, herramienta de monitorización, gestión y conservación del arte rupestre.....	43
2.2.1. Introducción	43
2.2.2. Fundamento de la teledetección para la obtención del dato.	44
2.2.3. Magnitudes radiométricas	45
2.2.4. El espectro electromagnético.....	50
2.2.5. Respuestas de la superficie a la radiación.....	53
2.2.6. Constituyentes atmosféricos.....	57
2.2.7. La teledetección en cuevas.....	59
2.3. Características de las fuentes de luz.....	73
2.3.1. Espectro continuo.....	77
2.3.2. Líneas espectrales.....	77
2.3.3. Color	78

2.3.4. Absorción.....	79
2.3.5. Propiedades cualitativas y cuantitativas de la luz	79
2.3.6. Lámparas	82
Capítulo 3: Análisis de laboratorio para el control de la interacción luz-medio.....	95
3.1. Metodología propuesta	95
3.2. Resultados relativos a fuentes de iluminación	97
3.2.1. Lámparas incandescentes.....	97
3.2.2. Lámparas halógenas	100
3.2.3. Lámparas infrarrojas.....	102
3.2.4. Lámparas Fluorescentes	103
Capítulo 4: Buenas prácticas para la captura de información radiométrica en arte rupestre .	105
4.1. Metodología propuesta	105
4.2. Equipamiento.....	106
4.2.1. Espectroradiómetro de campo.....	106
4.2.2. Sensores.....	121
4.2.3. Fuentes de iluminación.	125
6.2.4. Sistema de control del impacto de las luces	125
4.3. Conclusiones	127
Capítulo 5: Metodología para la captura de información métrica y radiométrica	129
5.1. Ámbito de aplicación	129
5.2. Captura de información en campo	129
5.2.1. Selección de las zonas de estudio en cueva	129
5.2.2. Organización de las campañas de campo.....	137
5.3. Procesado de datos.....	139
5.3.1. Gestión de información métrica de paneles.	139
5.3.2. Gestión de información radiométrica	144
5.3.3. Procesado de los paneles	149
Capítulo 6: Resultados.....	155
6.1. Campaña de espectroradiómetro.....	155
6.2. Resultados del análisis espectral relativos al arte	158
6.2.1. Zona de Trabajo -1	159
6.2.2. Zona de Trabajo -2	162
6.2.3. Zona de Trabajo -3	168
6.2.4. Zona de Trabajo -4	175

6.2.5. Zona de Trabajo -5	181
6.2.6. Zona de Trabajo -6	189
6.2.7. Zona de Trabajo -7	194
Capítulo 7: Conclusiones	201
7.1. Introducción.....	201
7.2. Conclusiones generales.....	202
7.3. Conclusiones particulares	203
7.3.1. Georreferenciación y geomática	203
7.3.2. Corrección radiométrica de los datos del sensor.	204
7.3.3. Procesado de los datos corregidos.....	205
7.3.4. Espectroradiometro.....	205
7.4. Conclusiones sobre el problema de investigación.....	206
7.5. Investigaciones futuras	210
Capítulo 8: Bibliografía	213

Lista de figuras

Figura 1: Titulares de prensa entre 1977 y 1978 ante el cierre de la cueva de Altamira. (Lasheras <i>et al</i> , 2014)	20
Figura 2: Elementos bióticos y abióticos del sistema kárstico (adaptado de Berthelin, 1983)...	21
Figura 3: a) Plano en planta de la cueva de El Castillo que figura en <i>Les cavernes de la Région Cantabrique</i> de 1911 (Alcalde del Río, <i>et.al</i> , 1911) b) Plano del Espeleoclub de Gràcia de 1982 (Espeleo Club de Gràcia, 1982) c) Plano en planta de la cueva de El Castillo actual.	26
Figura 4: Detalle del modelo 3D del karst con la cueva de El Castillo (superior), Chimeneas (inferior) y Las Monedas (izquierda)	27
Figura 5: Diagrama de flujo de trabajo de la geomática	28
Figura 6: Levantamiento del entorno de protección junto con marco de referencia materializado representado con un símbolo triangular negro.	30
Figura 7: Poligonal fundamental de la cueva de El Castillo.....	31
Figura 8: Vista planar de la nube de puntos mostrando espeleotemas.	32
Figura 9: a) Plano en planta y b) detalle de plano en planta de la cavidad.	33
Figura 10: Detalle de sección longitudinal de la cavidad.	34
Figura 11: Secciones transversales de detalle.....	35
Figura 12: Detalle de altura de galerías.	36
Figura 13: Mapa de monteras	37
Figura 14: Detalle de curvas de nivel de la cavidad.	38
Figura 15: Modelado poligonal continuo de la cueva	38
Figura 16: Firmas espectrales de las luces a distancia de trabajo. El eje vertical representa la potencia espectral relativa medida y el eje horizontal la longitud de onda en nanómetros donde fue medida.	40
Figura 17: Datacolor SpyderCHECKR	41
Figura 18: Etapas de procesamiento fotogramétrico	41
Figura 19:: Modelo geofísico de montera obtenido mediante georradar. En marrón oscuro aparecen reflejados los principales reflectores asociados a grietas, despegues o tableado de los estratos.....	43
Figura 20: El espectro electromagnético.....	52
Figura 21: Influencia de la materia orgánica en la reflectividad del paramento: a) mínima descomposición; b) descomposición parcial y c) máxima materia orgánica o descomposición completa.	65

Figura 22: Influencia espectral del suelo arcilloso con distinto contenido de humedad.....	66
Figura 23: Curva espectral del suelo arenoso con distinto contenido de humedad.....	66
Figura 24: Relación entre la capacidad de penetración y la humedad del suelo.....	67
Figura 25: Curva de reflectividad de la vegetación sana.....	69
Figura 26: Espectros de reflectividad, absortividad y de transmisividad.....	70
Figura 27: Estructura de la hoja	72
Figura 28: Gente visitando la cueva de Altamira en 1902 con antorchas. (Fuente: Museo de Altamira).....	73
Figura 29: Alberto de Mónaco con vela de cera de abeja y H. Breuil con lámpara de gas de acetileno en la visita a la cueva de El Castillo de junio de 1909. Extraída de (Alcalde del Río <i>et al</i> , 1911).....	74
Figura 30: Instalación de luz eléctrica fluorescente en la Cueva de Altamira (Lasheras, <i>et al</i> , 2014).	75
Figura 31: Espectros de emisión de diferentes elementos	78
Figura 32: Los ángulos de reflexión.....	79
Figura 33: Refracción y reflexión.....	80
Figura 34: Lámparas incandescentes empleadas en las pruebas de laboratorio	98
Figura 35: Luxes observados utilizando como fuente de iluminación NitraphotB de 500W a diferentes distancias.	98
Figura 36: Luxes observados utilizando como fuente de iluminación Photolita de 500W a diferentes distancias	99
Figura 37: Luxes observados utilizando como fuente de iluminación Photocrescenta de 75W a diferentes distancias.	100
Figura 38: Luxes observados utilizando como fuente de iluminación Halolux de 150W a diferentes distancias	101
Figura 39: Luxes observados utilizando como fuente de iluminación Cromalita de 250W a diferentes distancias.	101
Figura 40: Luxes observados utilizando como fuente de iluminación Infrarroja de 150W a diferentes distancias	102
Figura 41: Luxes observados utilizando como fuente de iluminación Infrarroja de 250W a diferentes distancias	103
Figura 42: Componentes del Espectroradiómetro de campo	108
Figura 43: Captura de pantalla del software SpectraWiz Spectrometer v5.3.....	112

Figura 44: Opciones de tiempo de Integración y número de escaneos para promedio.....	113
Figura 45: Captura de información espectral indicando su almacenamiento en el ordenador	115
Figura 46: Hoja de cálculo en la pestaña “Post-pro”	119
Figura 47: Prototipo multibanda IRCAM-GIM.....	121
Figura 48: Sensor IRCAM GIM con óptica abierta funcionando en el interior de la cueva.....	122
Figura 49: Equipo MUSIS HS empleado.....	123
Figura 50: Equipo Specim V10E empleado en la campaña de campo	124
Figura 51: Firmas espectrales de las luces	125
Figura 52: Imagen termográfica correspondiente a antes y después de la toma.....	126
Figura 53: Gran Sala de la Cueva de El Castillo	129
Figura 54: a) Vista del modelo 3D del panel de las manos. b) Ortoimagen generada para registrar todos los datos hiperespectrales.	130
Figura 55: Sensor Specim V10E situado frente a panel.....	138
Figura 56: Diagrama general de flujo general para la georreferenciación y procesado de datos	139
Figura 57: Escaneo realizado mediante el láser escáner 3D FARO Photon 80.....	140
Figura 58: Ejemplo de carta de color empleada en campaña de campo.	142
Figura 59: Fases a seguir en el proceso fotogramétrico	143
Figura 60: Diagrama de flujo para las correcciones de los datos radiométricos	144
Figura 61: Composición RGB (640nm-550-nm-459nm) de imagen del panel de las manos y diferentes bandas obtenidas cada 50 nm entre 400 y 1000 nm.	145
Figura 62: Pixel anómalo en imagen. Se puede apreciar en la parte central.....	146
Figura 63: Ejemplo del modelo 3D con textura real de la zona de trabajo 2.....	148
Figura 64: Ejemplo del modelo 3D con textura real y composición en falso color de la zona de trabajo 3	148
Figura 65: Diagrama de flujo de trabajo utilizado para la realización de este trabajo	149
Figura 66: Espectroradiómetro en disposición de tomar lectura.	155
Figura 67: Firmas espectrales de pigmento ocre en las manos.	156
Figura 68: Composición en falso color con la reconstrucción de los trazos grabados y pigmento en la zona de trabajo 1.....	160
Figura 69: Composición en falso color con detalle de grabado y pigmento en el que se aprecia el proceso de ejecución en la zona de trabajo 1.....	161
Figura 70: Comparativa entre la información conocida y el resultado del análisis para la zona de trabajo 1	161

Figura 71: Reconstrucción de los procesos de limpieza de grafitis en zona de trabajo 2.....	164
Figura 72: Resultado del análisis de separabilidad de ocres y diferenciación de ellos en la zona de trabajo 2	164
Figura 73: Recuperación y aislamiento de tipos de pigmento en la zona de trabajo 2. A imagen a) muestra en blanco ocres similares y la imagen b) muestra en negro otro tipo de ocre.	165
Figura 74: Calco de Alcalde Del Río, <i>et al.</i> 1911 (a) y Ruiz-Redondo, 2010 (b)	166
Figura 75: Fragmento del calco actual de la zona por S. Ripoll.....	166
Figura 76: Reconstrucción del proceso técnico en la zona de trabajo 3.....	170
Figura 77: Delineación de los trazos grabados sobre pigmento en la zona de trabajo 3	170
Figura 78: Composición en falso color del motivo con pigmento y grabado superpuesto.....	171
Figura 79: Composición en falso color de la figura 2 de la en la zona de trabajo 3.....	171
Figura 80: Información de la capa de “enlucido” para la reconstrucción del proceso técnico	172
Figura 81: Reconstrucción de los límites de los contornos de la figura.....	172
Figura 82: Documentación de los límites de los contornos de la figura.	173
Figura 83: En negro se muestran los pigmentos de la figura 1 empleados en la figura 2 en la zona de trabajo 3.....	173
Figura 84: Comparativa entre la información conocida y el resultado del análisis para la zona de trabajo 3	174
Figura 85: Análisis de separabilidad de ocres de la Zona de trabajo 4. En la imagen a) se observa el caballo superpuesto en blanco, sobre el caballo b) en negro.	177
Figura 86: Calco H. Breuil de la figura nº 1 de la zona de trabajo 4.....	178
Figura 87: Calco de Garate (2006).....	178
Figura 88: Resultado del análisis de la Zona de trabajo 4	179
Figura 89: Superposición del calco sobre la ortoimagen del panel en la zona de trabajo 4.....	180
Figura 90: Imágenes correspondientes a: a) la primera fase de las manos (en rojo); b) la segunda fase, elaborada con pigmento amarillo o siena, muy distinguida y centrada en el conjunto de los uros; c) la tercera fase con representaciones zoomorfas y dos signos cuadrangulares o tectiformes pintados en pigmento amarillo (en negro); y d) la cuarta fase, que corresponde a la segunda fase de las manos.....	185
Figura 91: Superposición de las dos fases de manos. En azul se muestran las manos de la 1ª fase y en rojo las de la segunda fase.....	185
Figura 92: a) Interpretación hecha en 1911 por Alcalde del Río. b) Nueva cartografía de pigmentos obtenida a partir de datos hiperespectrales del panel de las manos.	187

Figura 93: Calco de H. Breuil en (Alcalde Del Río, <i>et al.</i> 1911) del panel y del bisonte en la zona inferior derecha.....	191
Figura 94: Calco de E. Ripoll del panel y del bisonte en la zona inferior derecha.....	191
Figura 95: Resultado del análisis realizado en la zona de trabajo 6.....	192
Figura 96: Zonas afectadas por lixiviación y recubrimiento calcítico.....	196
Figura 97: Recuperación de contornos de la figura	196
Figura 98: Extracción de pigmentos subyacentes bajo la costra calcítica y el pigmento ocre.	197
Figura 99: Interpretación de Alcalde Del Río, <i>et al.</i> 1911 del Panel de la zona de trabajo 5	197
Figura 100: Nuevo calco obtenido mediante la integración de técnicas	198
Figura 101: Superposición del calco sobre la ortoimagen en la zona de trabajo 5	199

Lista de tablas

Tabla 1: Componentes mayoritarios de la atmósfera	58
Tabla 2: Componentes minoritarios de la atmósfera	58
Tabla 3: Iluminación en la visitas de las cuevas a lo largo de la historia.....	75
Tabla 4:Resumen con las diferentes fuentes de iluminación.....	93
Tabla 5: Conversión energía potencia para diferentes fuentes de luz.....	94
Tabla 6: Características técnicas del sensor hiperespectral Specim V10E.....	123
Tabla 7: Características técnicas de la cámara termográfica FLIR T620	126
Tabla 8: Resumen de resultados en la revisión del panel de las manos completo.....	186
Tabla 9: Tabla resumen de figuras publicadas por Alcalde Del Río, <i>et.al.</i> , 1911) frente a las existentes tras la revisión.....	193

Capítulo 1. Planteamiento general de la investigación

1.1. Introducción general

Los sitios de arte rupestre contienen algunas de las mayores obras de arte del mundo, imágenes estéticamente poderosas y cargadas de espiritualidad incrustadas en paisajes culturales. El arte rupestre consiste en pinturas, dibujos, grabados, impresiones, tallas en bajorrelieve y figuras en abrigos y cuevas. El arte rupestre refleja el rico patrimonio espiritual y cultural de la humanidad y tiene un gran significado para sus creadores y sus descendientes. También tiene un gran significado para la humanidad en general. Su belleza, su simbolismo y su rica narrativa hacen que sea muy apreciado y atesorado a nivel internacional, regional y local. Su existencia es importante puesto que ayuda a las comunidades mundiales a reconocer y aprender sobre las diversas tradiciones culturales, sus antiguos orígenes y las relaciones con los paisajes que han habitado.

El arte rupestre está en peligro debido a las presiones del desarrollo, el grafiti/vandalismo, la mala gestión del turismo y los impactos naturales. Es necesario crear conciencia sobre el arte rupestre, el alcance y la gravedad de las amenazas que lo afectan y la necesidad de dar respuestas eficaces a esas amenazas. La concienciación pública y política sobre el arte rupestre es vital para la planificación y el presupuesto de la conservación y la gestión (Ontañón, *et al.* 2014).

Además, se necesitan sistemas para gestionar los sitios con arte y paisajes rupestres. Esto incluye la identificación de la importancia de los sitios, sus necesidades de gestión y el desarrollo de estrategias para su conservación a largo plazo.

La investigación y la acción que abordan estos problemas son necesarias si queremos preservar nuestro patrimonio de arte rupestre para el futuro. La investigación es un proceso que procura obtener información relevante y fidedigna mediante la aplicación del método científico. Por tanto, la investigación tiene como base el método científico¹ y éste es el método de estudio sistemático de la naturaleza que incluye las técnicas de observación, las reglas para el razonamiento y la predicción.

¹ Cuando se analiza un determinado fenómeno se procede sistemáticamente, siguiendo una serie de etapas establecidas en sus pasos fundamentales. Esta secuencia constituye el denominado método científico, o experimental.

A pesar de que algunos países se esfuerzan en la investigación y la conservación, todos los yacimientos de arte rupestre están experimentando continuas y nuevas amenazas a su supervivencia.

El método científico se estructura de la siguiente manera: observación o experimentación, organización, hipótesis y teoría y, por último, verificación y predicción. La investigación nos permite conocer mejor la realidad mediante la formulación de nuevas teorías o modificando las ya existentes, todo ello encaminado a incrementar el conocimiento. El éxito del trabajo investigador va a depender de la elección y aplicación de una serie de elementos que hacen accesible el objeto al conocimiento. Desde el punto de vista estructural se reconocen cuatro elementos presentes en toda investigación: sujeto, objeto, medio y fin.

Se entiende por sujeto el investigador, es decir, el que desarrolla la actividad; por objeto, lo que se indaga, esto es, la materia o el tema; por medio, lo que se requiere para llevar a cabo la actividad, es decir, el conjunto de métodos y técnicas adecuados y por objetivos, los propósitos de la actividad de búsqueda, solución de la problemática detectada.

Las características básicas de la Investigación Científica se pueden resumir en:

- recoger conocimiento o datos de fuentes primarias;
- descubrir principios generales;
- ser objetiva;
- ser metódica, es decir, requiere un planteamiento, recolección, registro y análisis de los datos;
- estar vinculada a la actividad del hombre;
- la práctica como criterio de verdad;
- debe ser considerado como un sistema.

Para conseguir una mejora en los procesos de documentación es necesario disponer información precisa de los paneles, los pigmentos y otros posibles elementos en el soporte tales como hongos, bacterias, humedad, concreciones calcíticas, etc. Esta información se puede obtener de muchos tipos de análisis y métodos, pero uno de los más extendidos por sus muchas ventajas es la teledetección y la fotogrametría.

1.2. Justificación

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, a través de representaciones de grabados y pintura con pigmentos en las superficies de cuevas (Muñoz, *et al.*, 2015). Dichas cavidades suelen formar parte de sistemas kársticos, que evolucionan a través del tiempo, y además incluyen microhábitats en los que se desarrollan comunidades animales y vegetales (Montes, *et al.*, 2017 y Ontañón, *et al* 2019)). En un determinado momento, el Hombre aprovechó algunas de estas cavidades para habitarlas, ocupando estos microhábitats, de forma que se integró y formó parte activa de la evolución del propio sistema kárstico alterándolo con aportes de materia orgánica y fuego; el redescubrimiento de estas cuevas por el Hombre moderno, con su admiración por la cultura prehistórica y su “derecho” a contemplarla, trasmitirla, explotarla y, a la vez, protegerla hace necesario analizar la sostenibilidad de tan preciado recurso.

Tradicionalmente, las estaciones prehistóricas y las cuevas en especial, si bien se han considerado como algo especial y frágil, y se han tratado de adoptar medidas para garantizar su conservación; la necesidad de atender a un número cada vez mayor de visitantes hizo que especialmente entre las décadas 50 y 70 del siglo XX se adaptasen los sitios para el turismo que unido a la masiva afluencia de público, produjo la rotura de su equilibrio natural que había permitido a tan frágil patrimonio perdurar durante tanto tiempo. El temor ante la puesta en peligro de la conservación de las pinturas motivó que cuevas como Altamira cerrase en 1977 al público tras haber soportado en 1973 los 174.000 habitantes. El cierre, junto con la situación política de la época, la disputa por la gestión y las presiones del sector turístico produjo una gran crisis socio-política en todos los ámbitos. A continuación, se muestra una serie de titulares de la prensa de la época.



Figura 1: Titulares de prensa entre 1977 y 1978 ante el cierre de la cueva de Altamira. (Lasheras *et al.*, 2014)

Las localizaciones en las que existe arte rupestre constituyen un sistema natural complejo (Ripoll, *et al.* 2013), en el que, además de las interacciones entre la roca, el agua y el aire, intervienen otros factores como la cohesión de los pigmentos utilizados, su composición, qué técnica se empleó en los grabados, existencia de comunidades vivas sobre o en la roca soporte y sus características, además de la incidencia de las acciones antrópicas.

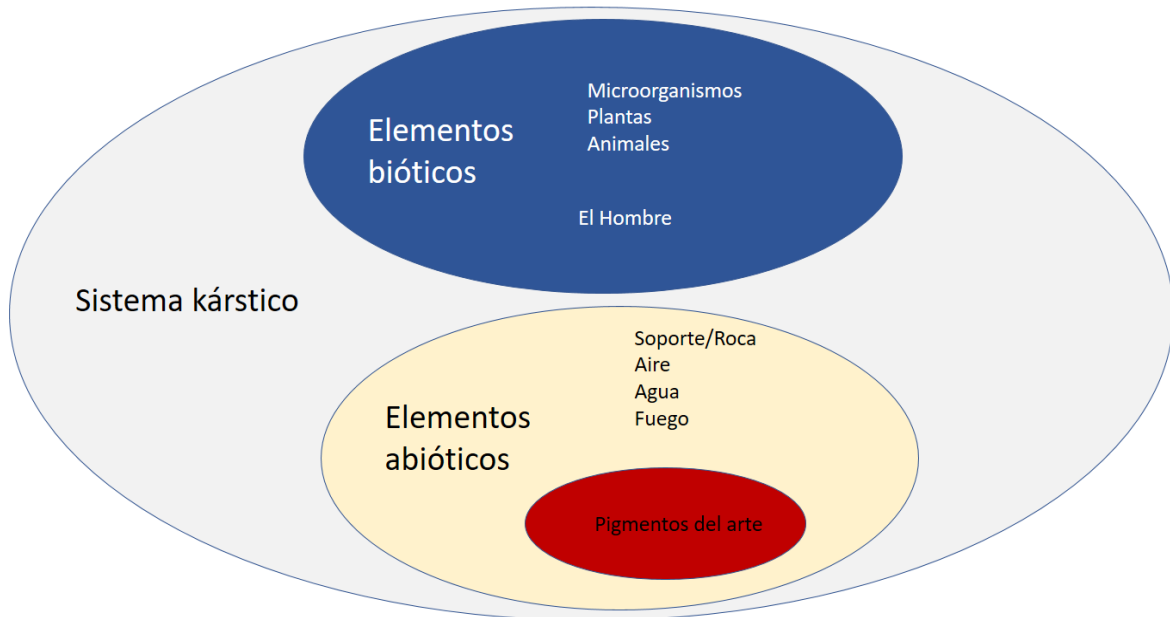


Figura 2: Elementos bióticos y abióticos del sistema kárstico (adaptado de Berthelin, 1983)

Ante esta situación, se optó por analizar la sostenibilidad que garantizase la conservación de las pinturas manteniendo estables las condiciones naturales de la caverna. En la mayor parte de los casos, la protección de las cuevas con arte rupestre ha sido el principal condicionante de las decisiones adoptadas.

La combinación de las técnicas de geomáticas como la teledetección, fotogrametría y los sistemas de información geográfica permiten el desarrollo de una metodología operativa para cuantificar, con un coste relativamente bajo, actuaciones que van encaminadas a llevar a cabo una gestión sostenible del patrimonio (Bayarri-Cayón, et al. 2013). Para realizar una adecuada gestión del patrimonio es esencial disponer de una buena información sistematizada y con actualización permanente, de la que se carece en muchos de los puntos de interés del patrimonio. Dichos métodos además se caracterizan por ser los más eficientes en lo que a documentación respecta y por tanto los más eficientes y de menor impacto para la cueva; cosa que favorece la sostenibilidad de la misma. Ya parecen quedar atrás los métodos de documentación invasiva de arte prehistórico empleados durante siglo XX, que se basaban principalmente en calcos directos, el calco por frotación o la elaboración de moldes directamente de los paneles de los elementos individuales.

La visión es quizás el más importante de los cinco sentidos que posee el hombre, tanto por la utilidad y satisfacción que proporciona: nos aporta de inmediato un marco de referencia de la

posición que ocupamos en el espacio, y nos permite evaluar todo lo que nos rodea de acuerdo a su forma, tamaño y color. Además, como está constituida por un sensor remoto como es el ojo humano y por el cerebro, tal evaluación se puede hacer a distancia, lo que significa que las decisiones y acciones que ejecuta un ser humano, incluso estando en movimiento, están relacionadas con el medio que le rodea; es decir, pueden ser hechas sobre la marcha o desarrollo de una tarea. La emulación de esto por una máquina por medio de un sensor óptico-electrónico y una computadora debidamente programada constituye un buen ejemplo de la inteligencia artificial. No es fácil establecer un punto de inicio en la historia de la teledetección de alta resolución dado que los primeros sistemas fueron militares. Las primeras reseñas (Jensen, 2007) hablan de 1960. Es el año supuesto en el que Estados Unidos pone en órbita el primer satélite de observación de la tierra equipado con un sensor óptico, por supuesto, con fines militares.

La teledetección parte del principio de la existencia de una perturbación (energía electromagnética, campos gravitacionales, ondas sísmicas,) que el sistema observado produce en el medio, la cuál es registrada por el sistema receptor para, posteriormente, ser interpretada. Para algunos autores como (Sabins, 1987), la teledetección es *el registro de información de un objeto sin entrar en contacto material con él en las regiones del ultravioleta, visible, infrarrojo y microondas, por medio de instrumentos como escáneres y cámaras localizadas en plataformas móviles (un avión o satélite) y el análisis de la información adquirida por medio de técnicas de fotointerpretación, interpretación de imágenes y procesado de las mismas*”.

1.3. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es analizar, desarrollar e implementar diferentes técnicas de análisis espectral y fotónico aplicado a un campo de especial interés para la sociedad, como es el arte rupestre paleolítico.

Otro objetivo es describir el proceso de integración de técnicas geomáticas para la georreferenciación precisa de paneles con arte rupestre; pues es de gran importancia conocer dónde están situados, pues saberlo es de una importancia crítica para establecer relaciones espaciales entre ellos.

Todos esos desarrollos permitirán disponer de una metodología aplicable a cualquier conjunto con pintura rupestre y supondrán una importante contribución a la internacionalización de la ciencia y la tecnología.

Los objetivos específicos se detallan a continuación:

- **Objetivo 1:** Realizar una revisión del estado del arte de los principios y técnicas de análisis de documentación de arte rupestre.
- **Objetivo 2:** Seleccionar una serie de tecnologías para diferentes procesos de documentación temática y tridimensional que se desarrollarán y analizarán para crear una metodología de documentación del arte rupestre.
- **Objetivo 3:** Revisión de una serie de paneles decorados complejos o con problemas de conservación susceptibles de análisis. En este objetivo se procederá a la elección de las unidades gráficas que hayan sido estudiadas con anterior y se adecuen a los objetivos y requisitos de la presente tesis, atendiendo siempre en primer lugar a criterios de conservación.
- **Objetivo 4:** Campaña de toma de datos

Se dispondrá de los datos registrados por la empresa GIM Geomatics, S.L. en diferentes campañas llevadas a cabo en diferentes emplazamientos, la cual ha proporcionado todos los datos brutos que deberán ser, en la siguiente fase, objeto de tratamiento informático.

- **Objetivo 5:** Evaluación de resultados

Este objetivo contempla la validación de los resultados obtenidos, evaluando el grado de ajuste con los objetivos del proyecto. Permitirá la aprobación de la metodología experimental desarrollada o, en caso contrario, la detección de los fallos del procedimiento aplicado y la implementación de los reajustes o mejoras necesarias.

1.4. Organización de la tesis

La tesis se organiza en 8 capítulos de la siguiente forma:

Capítulo 2: Se hace una revisión del estado del arte en lo que a respecta a documentación y análisis de datos de teledetección aplicados al arte rupestre. Este capítulo se subdivide en tres apartados: georreferenciación de datos e integración de técnicas geomáticas, teledetección terrestre hiperespectral y caracterización de las fuentes de luz.

Capítulo 3: Se presentan las aportaciones de la tesis en el estudio de laboratorio para el control de la interacción luz-medio, analizando la viabilidad de diferentes fuentes de iluminación.

Capítulo 4: Recopila una serie de buenas prácticas para la captura de información radiométrica en arte rupestre, describiendo la metodología propuesta el equipamiento y una serie de conclusiones.

Capítulo 5: Se explica la metodología para la extracción de información métrica y radiométrica, desde la captura de datos hasta el procesado de los mismos. Este capítulo explica la técnica hiperespectral, su metodología para la resolución de los problemas que se plantean y otro apartado donde se detallan las zonas estudiadas siguiendo la metodología desarrollada en la que se explica desde la casuística más sencilla (realce de pigmentos) a las más complejas (superposición de pigmentos bajo concreción calcítica).

Capítulo 6: Se establecen las aportaciones de la tesis en el estudio de diferentes paneles de arte rupestre usando técnicas hiperespectrales.

Capítulo 7: Se discuten las conclusiones extraídas del presente proyecto de tesis además del trabajo futuro que se deriva del mismo.

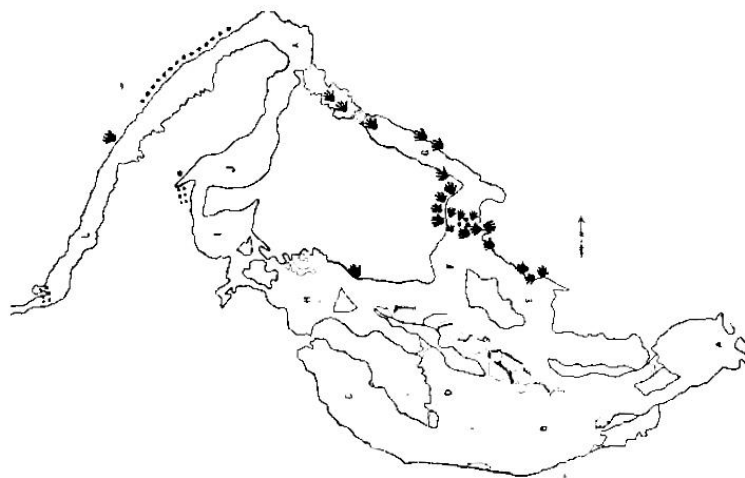
Capítulo 2: Técnicas de documentación tridimensional e hiperespectral

2.1.- Georreferenciación de datos y técnicas geomáticas.

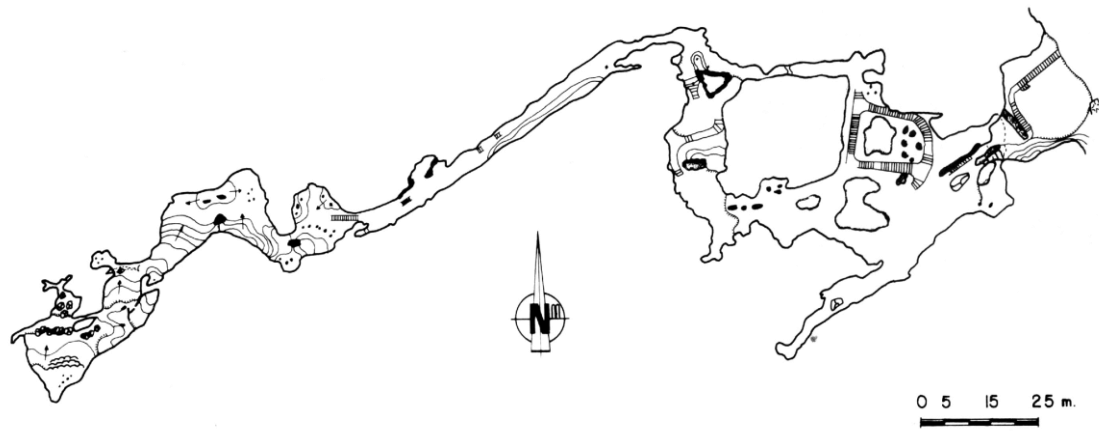
Existen cuevas que cuentan con diferentes versiones de cartografía, que a menudo no coinciden como consecuencia de la diferente fiabilidad de los métodos empleados y de la complejidad de las mismas.

La importancia que se le da a la geomática (si bien tradicionalmente se le ha dado sólo a la topografía), dentro de la espeleología, estriba en que cualquier estudio posterior al descubrimiento de una cavidad necesita un plano de ella en el que basarse. De aquí que el levantamiento topográfico sea una de las primeras labores que se realizan. Las diferentes ciencias geomáticas de representación del terreno son, por tanto, las primeras técnicas auxiliares de la espeleología; esto es, una base fundamental sobre la que apoyar posteriormente diferente información multidisciplinar proveniente de otras ciencias (Bayarri-Cayón y Castillo, 2009).

Tradicionalmente, la topografía tenía como objetivo el dibujo final de una planta, un perfil longitudinal y algunas secciones. Tener una base cartográfica precisa y rigurosa de cavidades facilita la creación de proyectos de mejora de accesos, la localización de testigos empleados en la monitorización de parámetros como la temperatura, humedad, concentración de gases o el cálculo de posición e intensidad de dispositivos de iluminación, con el objeto de que sean menos agresivos con el entorno, en el caso de aquellas cuevas que cuentan con arte rupestre.



(a)



(b)



(c)

Figura 3: 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 Espeleoclub de Gràcia de 1982 (Espeleo Club de Gràcia, 1982) c) Plano en planta de la cueva de El Castillo actual.

Las integración de herramientas geomáticas tradicionales como son 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, secciones longitudinales y transversales; análisis tridimensionales como cálculo de alturas de galerías, monteras, documentación del karst (Figura 4) y hasta sistemas de realidad virtual (Barrera, S. *et.al*, 2008).

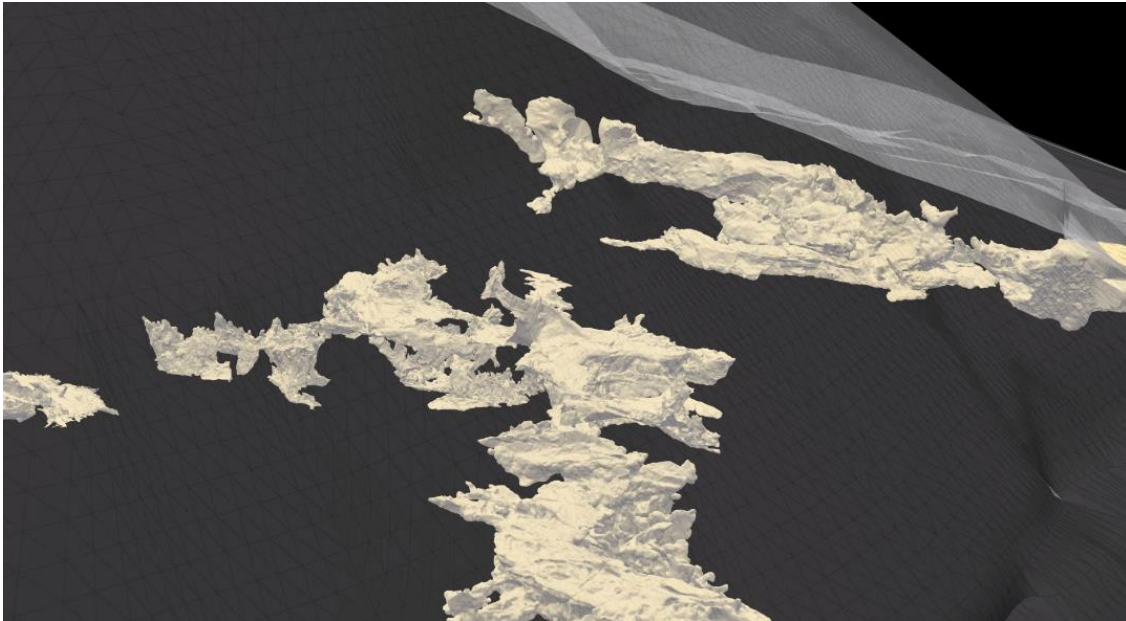


Figura 4: Detalle del modelo 3D del karst con la cueva de El Castillo (superior), Chimeneas (inferior) y Las Monedas (izquierda)

Disponer de una base cartográfica precisa de una cavidad tanto en 2D como en 3D, 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.

Cada día se realizan más estudios, y éstos con mayor detalle llegando a existir auténticos laboratorios subterráneos en los que se trata de comprender:

- **Estudios hidroquímicos:** Los estudios sistemáticos de las características físicas y químicas de las aguas, constituyen uno de los métodos para dar seguimiento a la evolución del karst. Se vuelca información como el pH, la temperatura del agua, la conductividad, los sólidos totales disueltos, el CO₂ disuelto y el O₂ disuelto.

- **Estudios climáticos:** La presencia de personas en el interior de las cavidades puede generar diferentes tipos de contaminación térmica, química y biológica. La cantidad de personas que a diario permanecen cierto tiempo en la cueva es una fuente importante de generación de calor y aporte de CO₂ a la atmósfera confinada. Por ello, la definición de un umbral de equilibrio debe ser una práctica común en la gestión ambiental de cualquier cavidad turística, ya que permite establecer un régimen óptimo de visitas, clave en la conservación del patrimonio kárstico (Fortea-Pérez, 1993 y Juberthie, 1995).
- **Estudios de fauna**
- **Estudios geotécnicos**

Se miden múltiples parámetros, y muchos de ellos altamente correlacionados. El disponer de una cartografía lo suficientemente precisa ayuda en la aplicación de modelos de predicción de comportamientos o respuestas (Ontañón, *et al.* 2019). Además, la información creada, también puede ser empleada para la divulgación de la cueva y su complejo.

A continuación, se describen las tareas necesarias tanto en la captura como en el tratamiento de los datos para poder generar documentación métrica de alta precisión y detalle de elementos tan complejos y singulares como las cuevas y las cavidades.

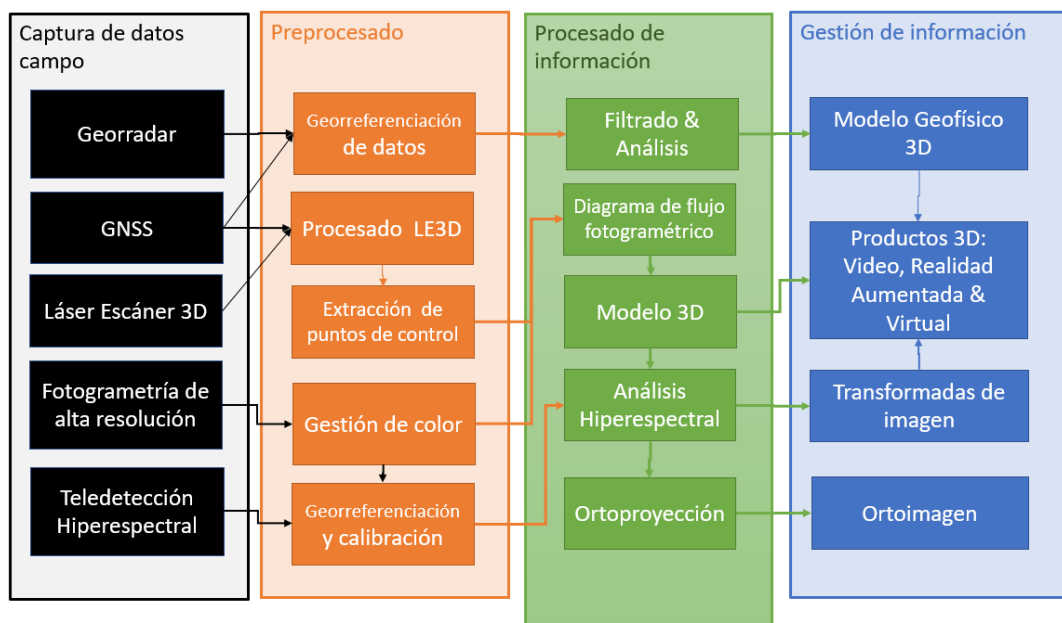


Figura 5: Diagrama de flujo de trabajo de la geomática

2.1.1. Creación del Marco de Referencia

Para llevar a cabo un correcto registro de la información de la cueva, en un sistema homogéneo, es necesario determinar con claridad el sistema de referencia y la proyección. En España, actualmente se entrega la documentación en el sistema de referencia global ETRS89 materializado por la Red Geodésica Nacional mediante técnicas espaciales (REGENTE), si bien gran cantidad de información histórica, que se emplea o empleará para ser correlacionada con la nueva generada no se encuentra en dicho sistema.

El sistema de referencia actual de los trabajos topogeodésicos es el ETRS89 (*European Terrestrial Reference System 1989*), siguiendo la recomendación del REAL DECRETO 1071/2007, de 27 de julio, (BOE núm. 207 Miércoles 29 agosto 2007) por el que se regula el sistema geodésico de referencia oficial en España.

2.1.2. Caracterización del Entorno de protección

Para poder documentar el karst, es necesario contar con información del lugar que alberga la cueva, esto es la montaña en donde se ubica. Para ello, es necesario:

A) Creación de la red de bases:

Una vez elegido el sistema de referencia, se determina una red de bases por el entorno de protección. El método de observación utilizado puede ser el diferencial tanto mediante observaciones en estático como en tiempo real RTK desde estaciones de referencia, obteniendo las líneas base e incrementos de coordenadas en el sistema global WGS84 desde el equipo de referencia al punto observado. Los tiempos de observación de determinan por el número y geometría (GDOP) de los satélites operativos, las perturbaciones de la ionosfera y por la longitud de las líneas-base.

Sobre el terreno se crea un fichero de datos para cada punto observado con su numeración definitiva, introduciendo los datos propios del punto. Posteriormente los datos se procesan para el cálculo de las líneas-base y resolución de ambigüedades, obteniendo a partir de las observaciones GPS, las coordenadas de todos los puntos en el sistema ETRS89.

En función de la extensión y del número de cuevas en la montaña, se implantan una serie bases ubicadas en las laderas, quedando materializadas en el terreno mediante clavos de acero o hitos tipo feno, ofreciendo garantías de permanencia. Cada entrada de cueva queda cubierta con al menos dos bases.

B) Levantamiento topo-geodésico.

A partir de las bases establecidas se procede a la toma de los puntos necesarios para la realización del levantamiento taquimétrico a la escala acordada del monte (generalmente 1:2000). La toma de los puntos del levantamiento se realiza de manera mixta, con Estación Topográfica Total en combinación con equipos GPS mediante observaciones diferenciales en tiempo real.

El marco de referencia para los datos de georreferenciación se creó fuera de la cueva y se midió con un modelo de TOPCON HIPER SR GNSS con receptor integrado GPS + GLONASS para la cinemática en tiempo real (RTK). El resultado es un conjunto de 4 o 5 coordenadas GNSS con precisión de centímetros (error inferior a 2 cm). Una vez observados los puntos se crea una red microgeodésica. La solución de mínimos cuadrados de una red es similar a la de una poligonal. En primer lugar, se ajusta una Red Libre; esto implica el uso de una pseudoinversa para resolver los sistemas que tienen menos del mínimo de control como lo describe Bjerhammar (1973). Luego la red se liga a los puntos GNSS previamente observados. El resultado es un conjunto de coordenadas de la Red Microgeodésica en el que se conoce la precisión y constituye el Marco de Referencia ETRS89 del sitio.

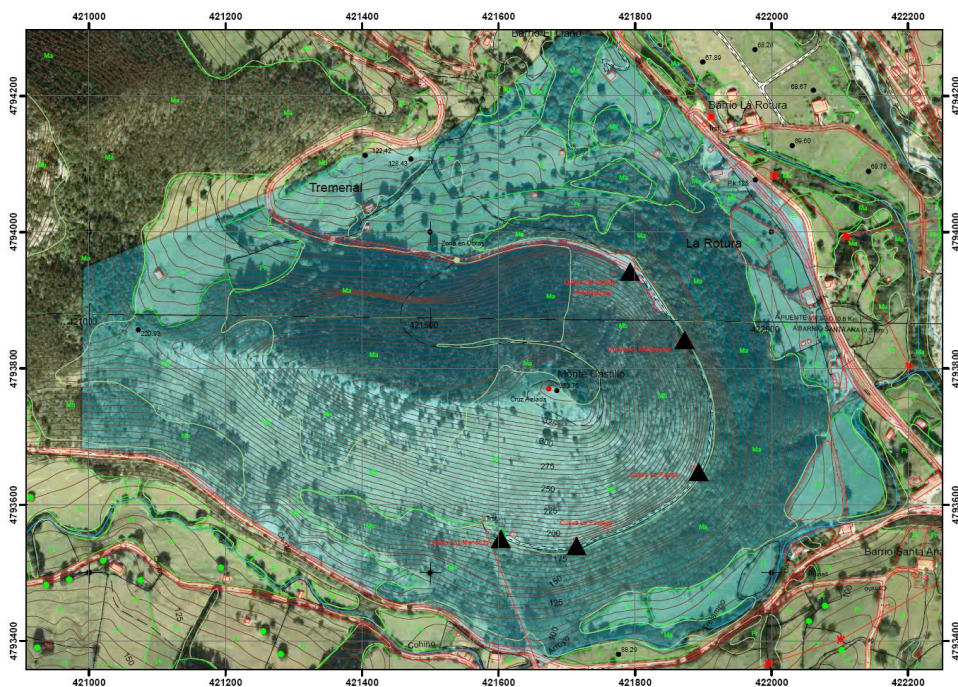


Figura 6: Levantamiento del entorno de protección junto con marco de referencia materializado representado con un símbolo triangular negro.

2.1.3. Digitalización de las cuevas

A) Elaboración de la poligonal fundamental:

Se observan poligonales cerradas, de ida y vuelta, que posteriormente se ajustan y compensan en la cueva. Las bases se suelen materializar mediante clavos de acero y desde ellas se radian una serie de bases destacadas y de dianas que se emplean como referencias para la digitalización por Láser Escáner 3D. En la figura posterior aparece un croquis de las poligonales realizadas (Bayarri-Cayón y Castillo, 2012)

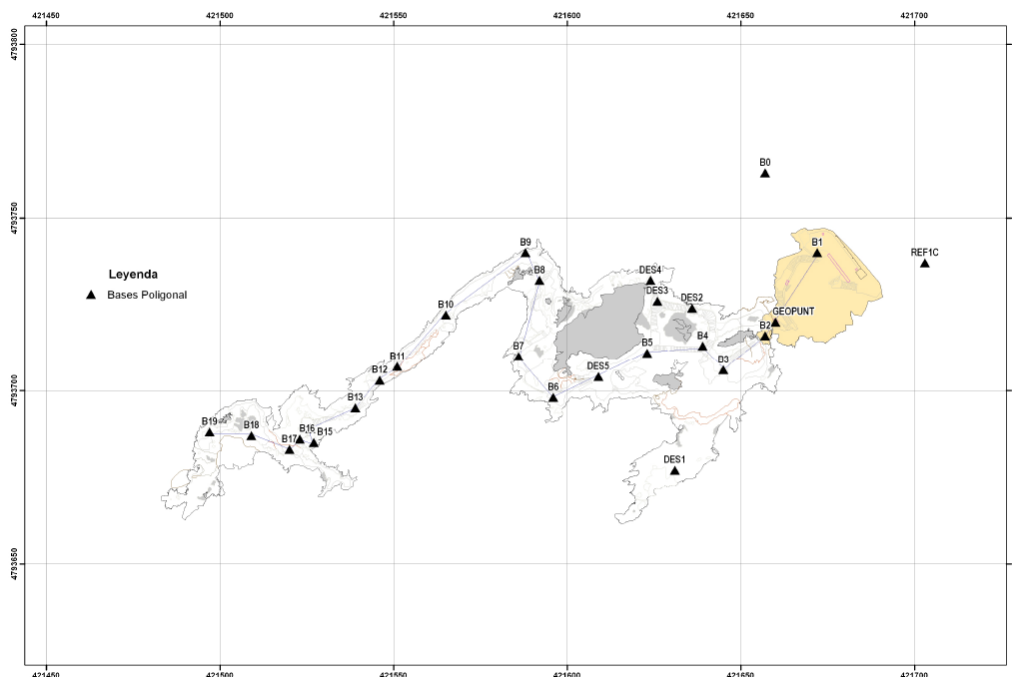


Figura 7: Poligonal fundamental de la cueva de El Castillo.

B) Escaneado de la cueva:

Se emplea un Láser Escáner Terrestre 3D panorámico de medición de fase, que actualmente pueden ofrecer una precisión de 1 a 3 mm en un punto a 25 m, con una reflectancia del 85 %; lo cual permite obtener documentos métricos que cumplan con las tolerancias métricas exigidas, generalmente de orden centimétrico (Bayarri-Cayón y Castillo, 2009)

En esta fase, se cubren las siguientes fases:

1. Posición y rotación del instrumento
2. Coordenadas espaciales: valor XYZ
3. Intensidad: valor de reflectancia de los materiales

La georreferenciación se realiza empleando las bases topográficas materializadas anteriormente.

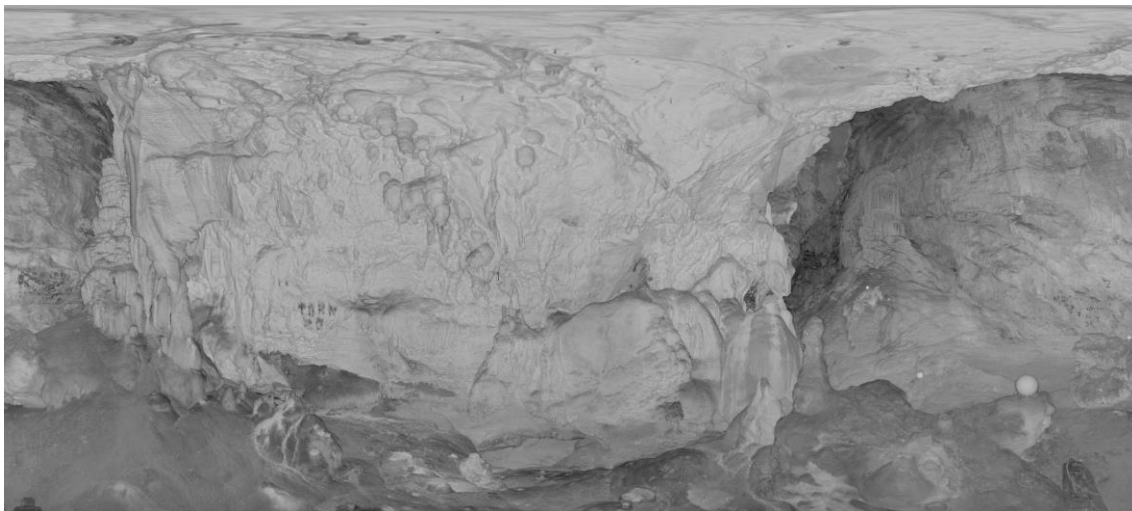


Figura 8: Vista planar de la nube de puntos mostrando espeleotemas.

Una vez recogida la información en el campo, pasa una serie de procesos para filtrar el ruido, registrar las posiciones de escaneo y optimizar del modelo en un único modelo para obtener un modelo georreferenciado 3D que será la base de los modelos fotogramétricos

2.1.4. Preprocesado de la información: Limpieza y registro

En esta etapa la información recogida en campo pasa una serie de procesos de filtrado y unión de la información en un único modelo:

1. Limpieza: Se ha eliminado toda aquella información que no se desea (ruido), ya sea de forma manual o automática.
2. Registro: Se encuentra la posición y rotación del instrumento para cada barrido en un sistema de coordenadas específico. Esto se puede hacer a través de referencias que actúan como puntos de control.
3. Optimización del modelo: creación de un modelo homogéneo. El modelo se estructura y divide en partes para facilitar su manejo y comprensión.

El resultado es una nube de puntos, procesada, libre de ruido, en el mismo sistema de referencia. Posteriormente se generaliza la información capturada, reduciendo información, con el objetivo de que fuese posible cargar en memoria la totalidad de los escaneos de ambas cuevas.

2.1.5. Procesado: Extracción de información del modelo.

A) Plano en planta

El mapa de planta se crea restituyendo sobre la misma nube de puntos. En dicho mapa, aparecen reflejados el contorno de las cavidades, los pasos superiores e inferiores donde los hubiese, los caminos y escaleras existentes en el interior y otros elementos correspondientes a la urbanización de las salas como puntos de luz. También se vuelca el eje de la poligonal empleado para observar el marco de referencia. Toda la información se encuentra dispuesta en capas.

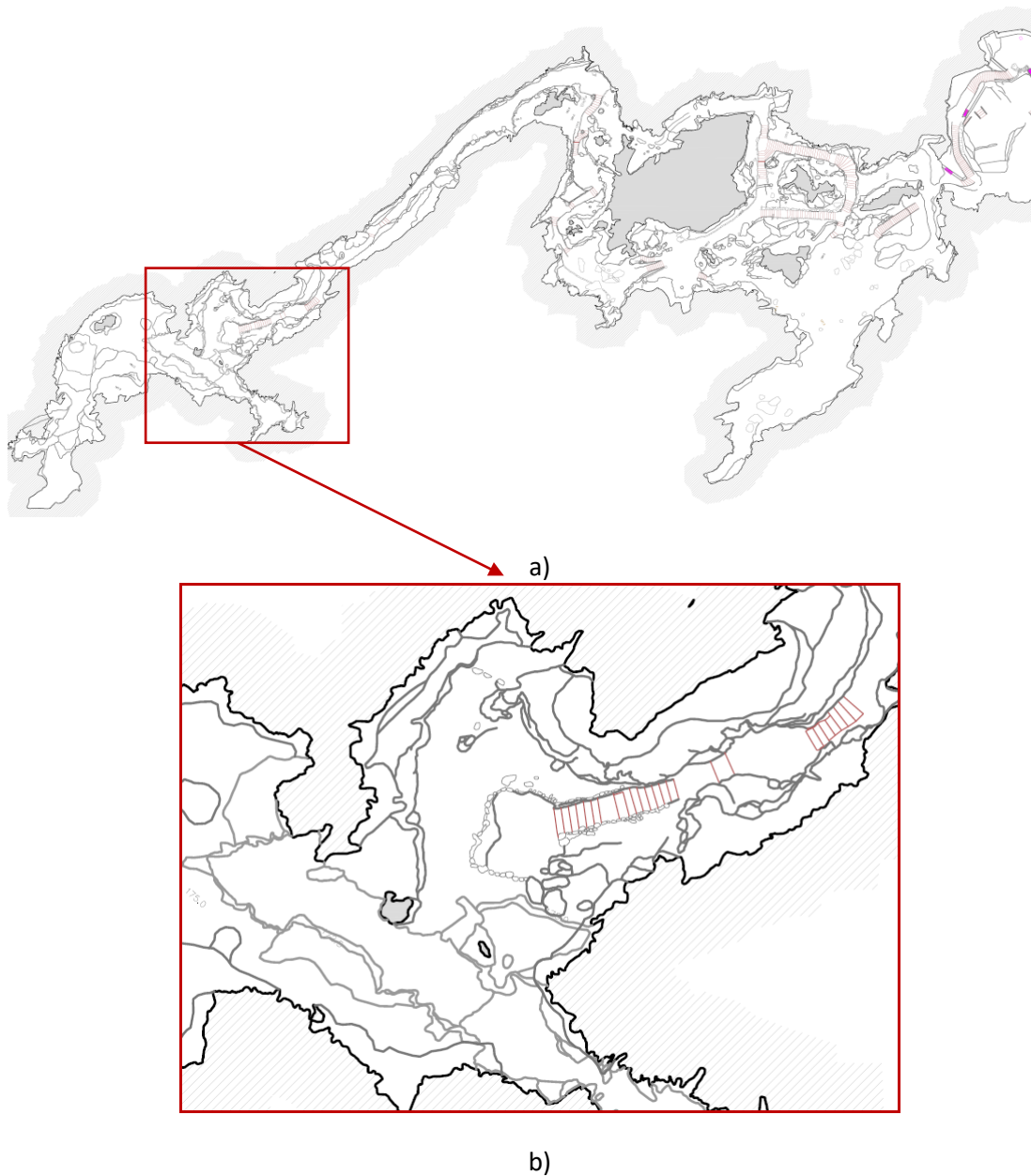
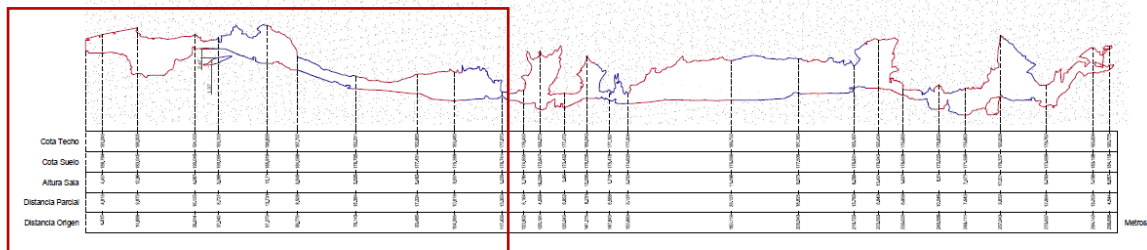


Figura 9: a) Plano en planta y b) detalle de plano en planta de la cavidad.

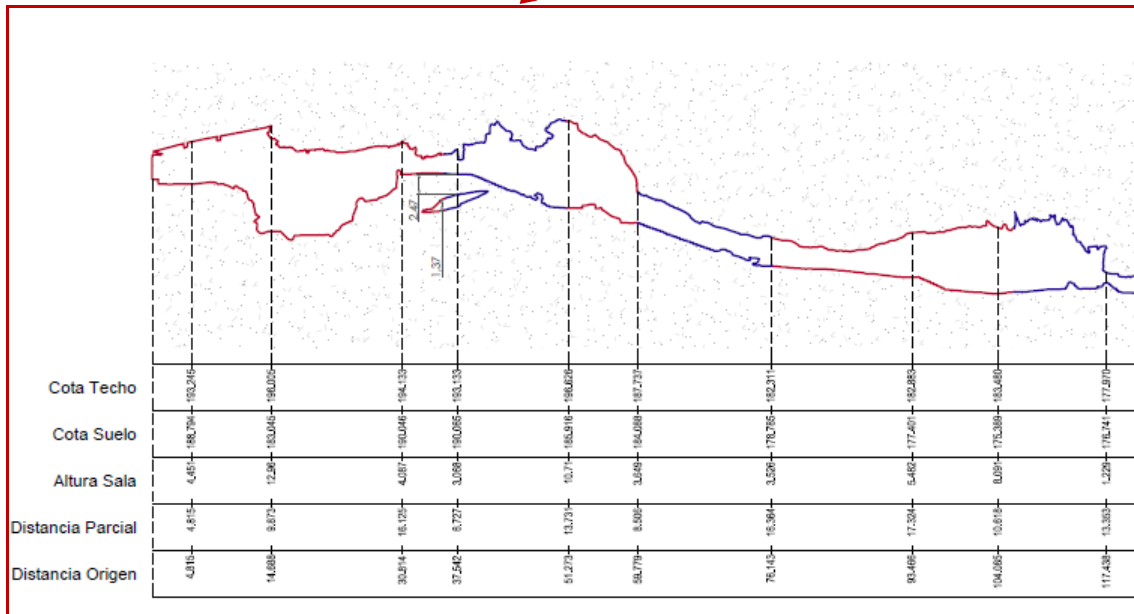
B) Secciones longitudinales

La sección longitudinal se suele trazar siguiendo el eje de la poligonal y en ella aparecen reflejadas, en forma de diagrama de guitarra la información de cota de techo, cota de suelo, altura de la sala, distancia parcial, distancia al origen, etc.

El disponer de una información continua, permite que la sección longitudinal pueda ser trazada por cualquier punto, al contrario que con los métodos tradicionales de medición.



a)



b)

Figura 10: Detalle de sección longitudinal de la cavidad.

C) Secciones transversales

Se crean y acotan a lo largo de toda la cueva secciones transversales en lugares de cambio de sección significativo o de especial interés.

Puesto que se cuenta con una gran densidad de información volumétrica, en el mismo sistema de referencia, es posible trazar una gran cantidad de secciones, y conocer de manera precisa distancia entre galerías, en el caso de que estas transcurran en paralelo. Si no es mediante el uso de estas técnicas combinadas, sería muy laborioso de lograr.

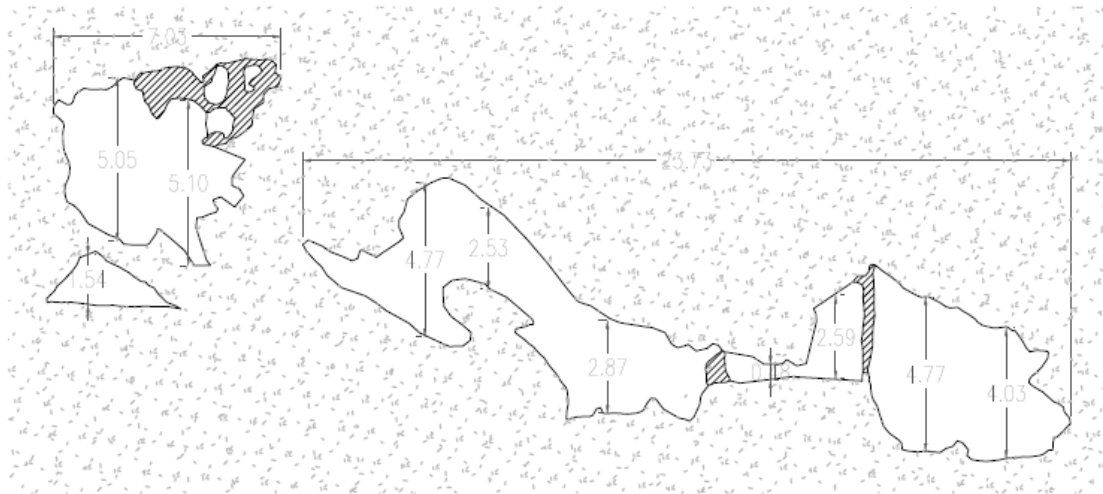


Figura 11: Secciones transversales de detalle.

D) Documentación de alturas de galerías

Se crea una serie de mapas con las alturas de las galerías. Dichos mapas suelen tener una resolución entre 5 y 20 cm. Desde el punto de vista de la geometría computacional aplicado a las cuevas se pueden definir diferentes alturas de galerías:

1. Simple: Caso de una galería lineal, es la distancia, para un mismo par de coordenadas X, Y entre la cota mínima y la máxima.
2. Zonas de sombra: En ocasiones no existe información en algunos puntos, pues no han sido escaneados al encontrarse en zonas de sombra. En dicho caso se realiza una interpolación entre los puntos vecinos, para poder contar con una superficie continua.
3. Compuesta: cuando existe una o varias galerías superpuestas. En este caso existen diferentes posibilidades. Calcular la distancia con el par de coordenadas de cada galería o reflejar el rango entre el máximo de la galería superior y el mínimo de la inferior. En función del fin de dicha cartografía se prefiere un método y otro.

Esta cartografía se suele emplear para realizar estudios climáticos y conocer posibles zonas de estancamiento del aire cálido de origen antropogénico.

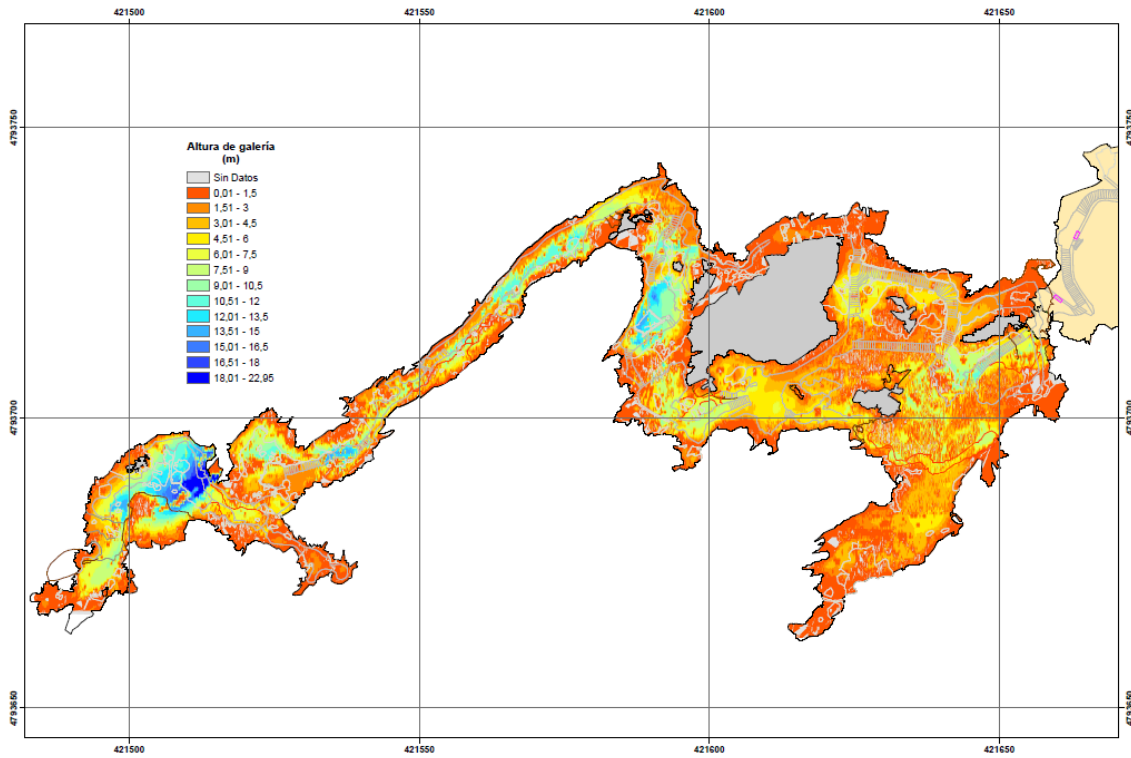


Figura 12: Detalle de altura de galerías.

E) Documentación de monteras

Se crea una serie de mapas de monteras de la cueva, definiéndose ésta como la distancia mínima para un mismo par de Coordenadas XY entre el techo de la cueva y la superficie. Dichos mapas suelen tener una resolución entre 1 y 10 cm. Desde el punto de vista de la geometría computacional es la distancia.

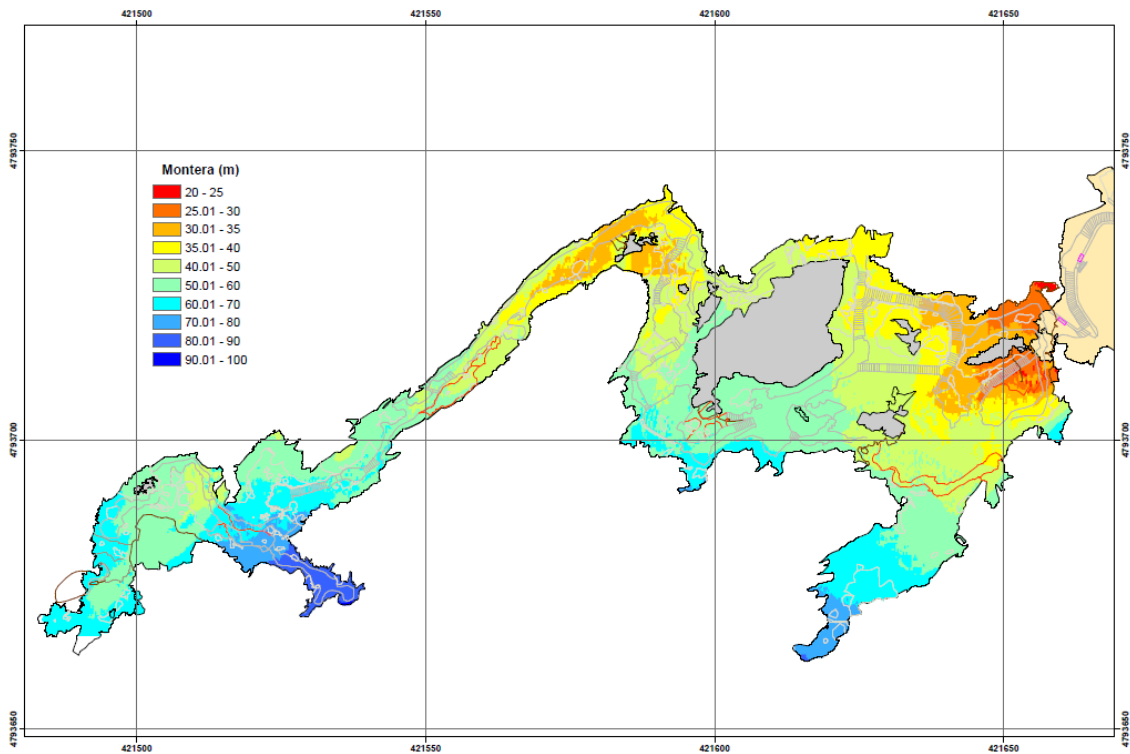


Figura 13: Mapa de monteras

F) Documentación vectorial de curvas de nivel

También es posible crear series de cartografía de curvas de nivel con equidistancias a partir de 10 cm. Tradicionalmente las curvas de nivel en cuevas se han trabajado elaborando dos modelos, el primero correspondiente al suelo y el segundo al techo de las cuevas. Esto se debe a las limitaciones de los programas topográficos que trabajan en entornos 2,5D, es decir, un par de coordenadas XY, únicamente puede tener un valor de cota, frente a los programas 3D actuales que ya permiten crear mallas 3D arbitrarias, no únicamente basadas en alturas.

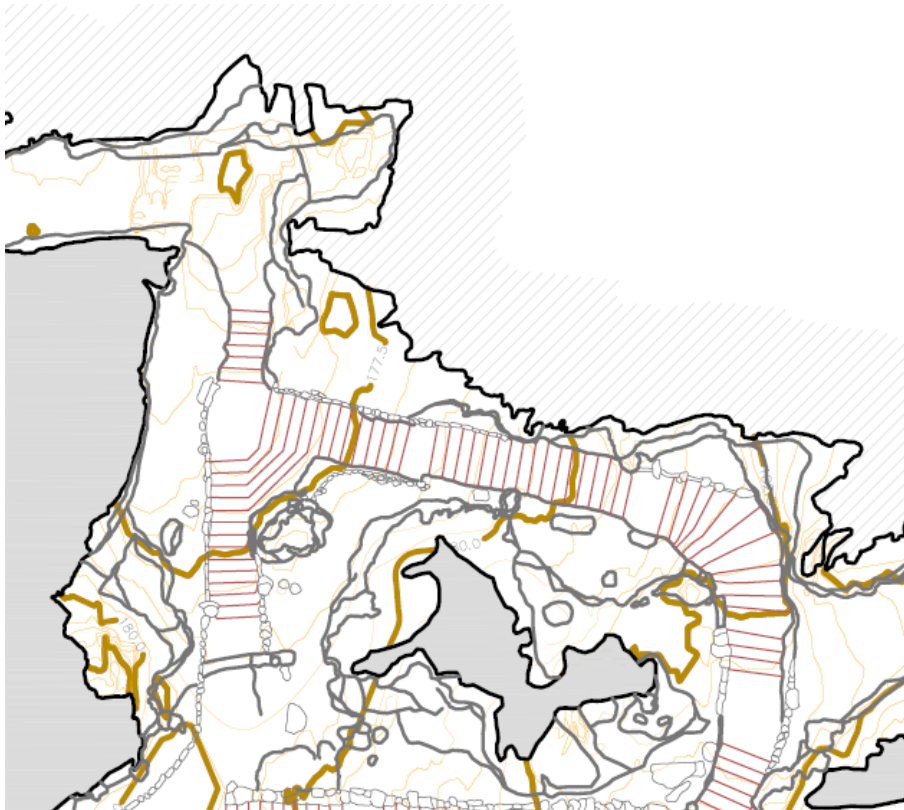
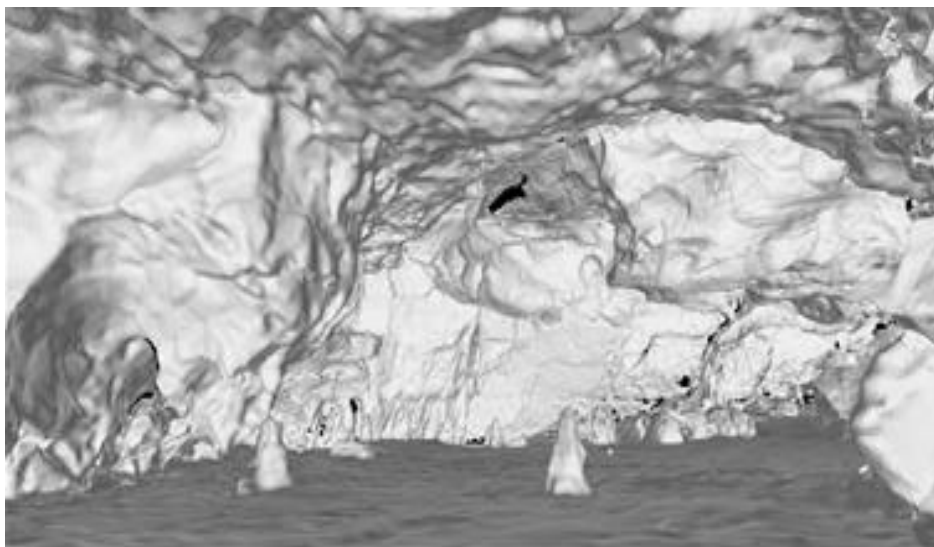


Figura 14: Detalle de curvas de nivel de la cavidad.

G) Modelado poligonal continuo

A partir de los datos de escaneo, es posible generar superficies de detalle variable para



réplicas físicas o virtuales.

Figura 15: Modelado poligonal continuo de la cueva

2.1.6. Flujo de trabajo fotogramétrico

El diagrama de flujo de la figura 5 muestra un método que integra diferentes técnicas geomáticas para poder propagar las coordenadas desde el exterior de las cuevas a los paneles con arte rupestre.

El objetivo es que la documentación realizada no sólo conserve el objeto, sino también los atributos que lo describen y su contenido (forma, color, textura, etc.) y la geometría (Bayarri-Cayón, *et al*, 2015). El objetivo es generar suficiente información para la restitución en caso de pérdida.

1. Fotogrametría de alta resolución: Las campañas de fotogrametría permiten la digitalización de los paneles decorados con una resolución de aproximadamente 50 micrómetros. Se asegura una cobertura estereoscópica en toda la zona, superponiendo las secciones adyacentes. El solapamiento longitudinal es del 80% y el transversal del 50%. En los cambios de dirección en la línea de vuelo el último y el primer cuadro se superponen en un 80%.

El equipo fotogramétrico utilizado fue el Sony A7R Mark II y el Sony A7S Mark II con lentes calibradas de 35 y 90 mm.

2. Fuentes de iluminación (ver sección 2.3): Para no dañar el arte rupestre, seguimos las recomendaciones del ICOM (Consejo Internacional de Museos), publicadas en la Guía de Préstamos de 1974 (sección 9). En las campañas de campo se calibraron 3 luces en el rango espectral donde los sensores estaban operativos:

- Luz LED ultravioleta
- Luz LED infrarroja
- Luz LED visible

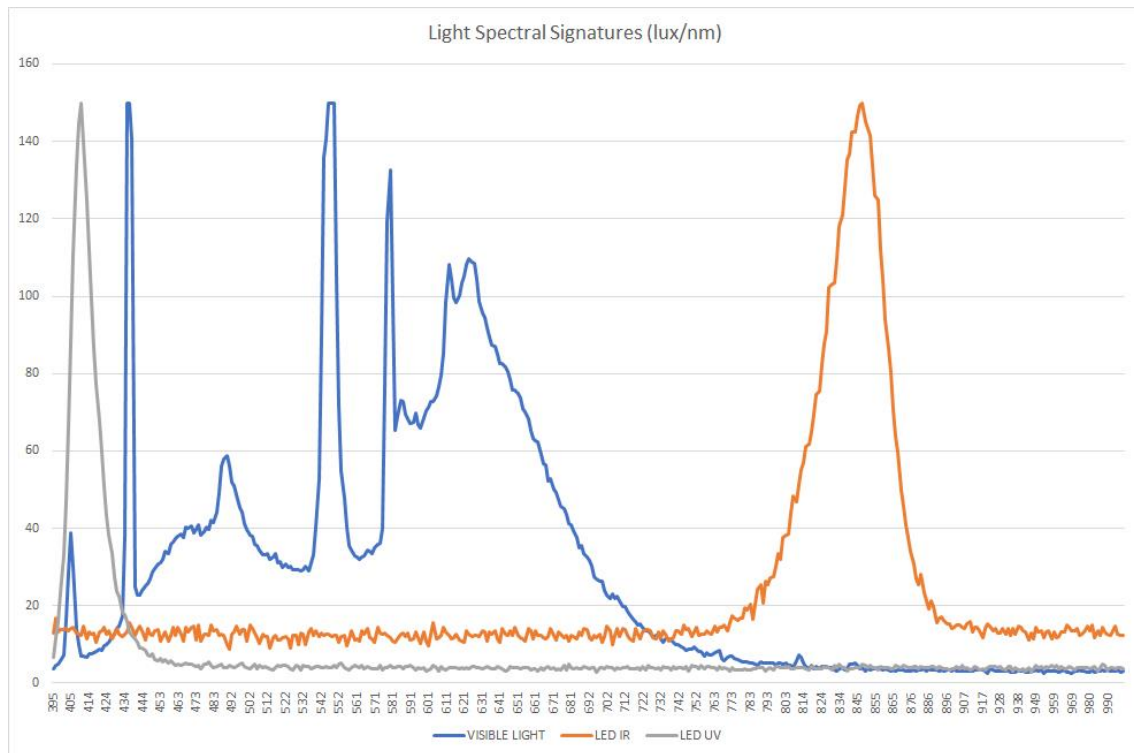


Figura 16: Firmas espectrales de las luces a distancia de trabajo. El eje vertical representa la potencia espectral relativa medida y el eje horizontal la longitud de onda en nanómetros donde fue medida.

3. Corrección radiométrica: Se lleva a cabo un método de gestión del color con el objetivo de mantener el color y su percepción constante a lo largo de la cadena de dispositivos o aplicaciones en los que se podría utilizar la información. Se utilizó una tabla de colores Datacolor SpyderCHECKR para registrar el color in situ y posteriormente se procesó como se describe en su guía de usuario. La radiometría de las imágenes procesadas ha hecho un uso efectivo de todos los bits según cada caso, evitando la aparición de niveles digitales vacíos en el caso de la imagen de 8 bits.



Figura 17: Datacolor SpyderCHECKR

4. Diagrama de flujo fotogramétrico: Una vez que las imágenes se registran en el campo y se corrige su color, se realiza el procesamiento. En esta fase las imágenes fotogramétricas se alinean usando métodos digitales. Se necesita extraer un conjunto de mínimo 12 puntos de control en cada panel. El ajuste del bloque se realiza simultáneamente mediante el ajuste del haz como se describe en Granshaw (1980). Todas las áreas propuestas están completamente aerotrianguladas. Como verificación del cálculo de la aerotriangulación, se incluyen puntos de control de precisión de al menos 1/3 del RMS final, para lo cual se utiliza la información existente en la nube de puntos. El diagrama de flujo seguido ha sido:

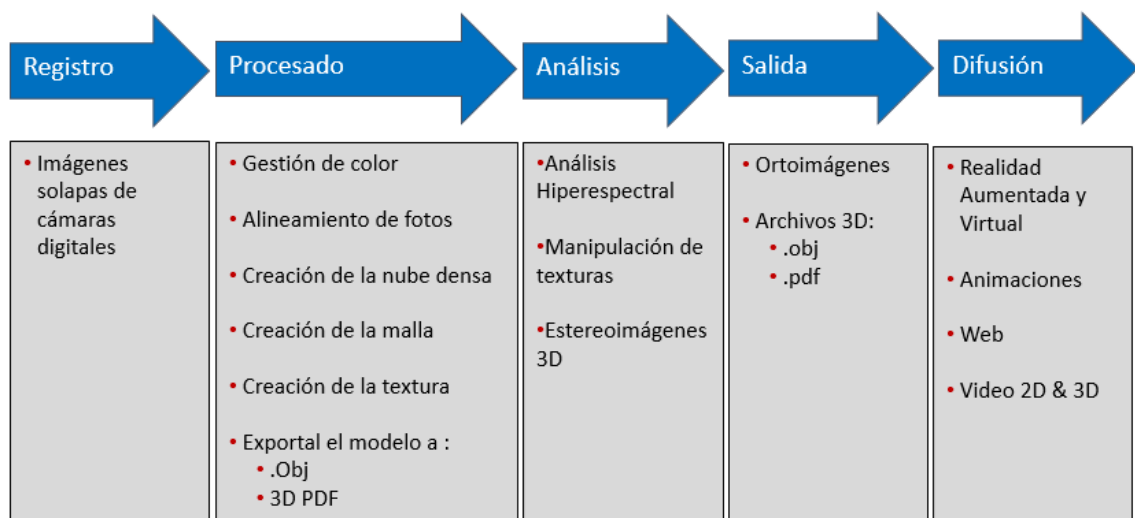


Figura 18: Etapas de procesamiento fotogramétrico

2.1.7. Geofísica - Georradar

El georradar es un método de prospección geofísica basado en la emisión de impulsos electromagnéticos de muy corta duración (entre 1 ns y 10 ns) en la banda de frecuencias de UHF-VHF (normalmente entre 100 MHz y 1,5 GHz). La técnica de georradar se basa en el principio de reflexión de ondas electromagnéticas que se propagan en un medio. La propagación de estos pulsos electromagnéticos por un medio se puede definir teóricamente a partir de las ecuaciones de Maxwell para ondas electromagnéticas.

Esquemáticamente, las mediciones se efectúan mediante la generación, por la antena emisora de una onda electromagnética con una frecuencia característica. Ésta se va propagando por el medio, hasta que alcanza una zona u objeto cuyas propiedades eléctricas son diferentes respecto a las circundantes o adyacentes, entonces, parte de la energía electromagnética se refleja hacia la superficie, mientras que el resto de energía continúa propagándose.

La onda electromagnética reflejada se recibe a través de la antena receptora y se registra (en forma de radargramas) para su posterior tratamiento e interpretación.

El actual *modus operandi* del georradar puede originar secciones verticales continuas (llamadas registros radar o radargramas) del subsuelo, similares en apariencia e interpretación a una sección sísmica. Las operaciones de campo con georradar son sencillas y la adquisición de datos es muy rápida. Estas mediciones se realizan desplazando las antenas del georradar en vehículos, soportes o manualmente.

Dependiendo del tipo de problema a resolver, es decir de la auscultación hasta la profundidad deseada (por ejemplo 25 cm, 50 cm, 1 m, 5 m, 10 m, 30 m, ...), debe utilizarse una o varias antenas emisoras y receptoras. Estas antenas tienen frecuencias de emisión generalmente de 1,5 GHz, 900 MHz, 500 MHz, 400 MHz, 200 MHz y 100 MHz. La frecuencia de emisión de los pulsos (orden de los kHz), la duración de éstos (orden de nanosegundos) y la amplificación de la señal a aplicar depende de cada tipo de problema a tratar y de las características de los materiales y/o terrenos a investigar.

El cartografiado en 3D del subsuelo mediante la técnica geofísica no invasiva de georradar en el complejo cárstico se ha centra fundamentalmente en la montera de la cueva y en su zona circundante. Las finalidades que persigue este estudio son:

- Analizar y cartografiar el sistema de fracturación interna de la montera.
- Evaluación de humedades en el subsuelo.

- Correlacionar los datos con la estratigrafía.
- Cartografiar y correlacionar las principales fracturas en la zona de afección.

Para ello se ha de contar con un levantamiento del entorno de protección.

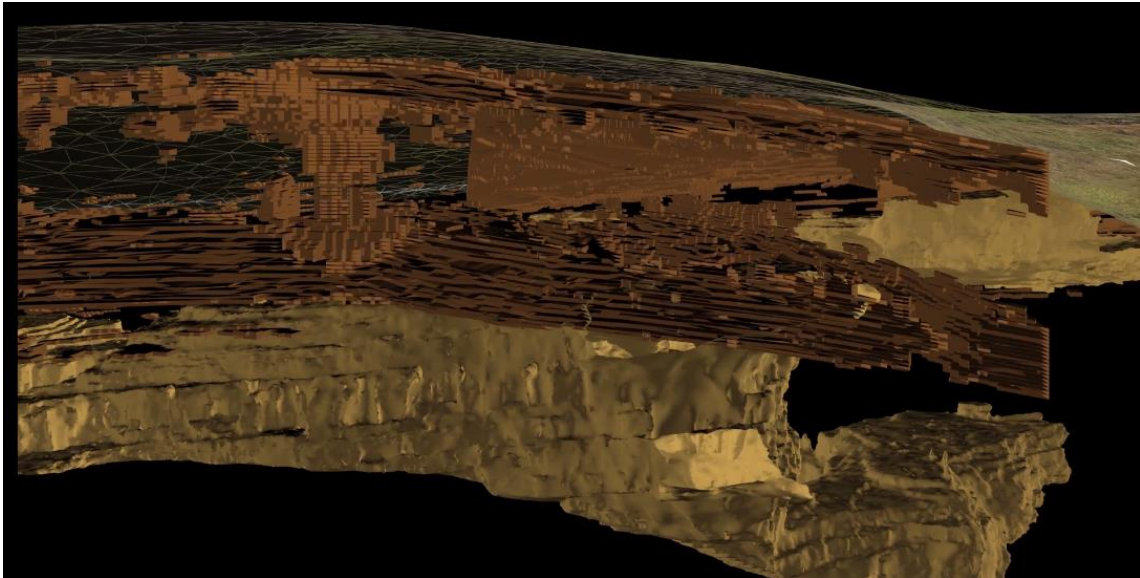


Figura 19:: Modelo geofísico de montera obtenido mediante georradar. En marrón oscuro aparecen reflejados los principales reflectores asociados a grietas, despegues o tableado de los estratos.

2.2. La teledetección terrestre, herramienta de monitorización, gestión y conservación del arte rupestre

2.2.1. Introducción

El vocablo teledetección deriva del francés *telédétection* y fue traducido en 1967 al término anglosajón *Remote Sensing* o percepción remota. No es fácil definir el concepto de teledetección, ya que no existe una definición única universalmente aceptada.

Fue introducido en el año 1960 y hacía referencia a la observación y adquisición de imágenes de la superficie terrestre desde sensores situados a bordo de plataformas espaciales. Sin pretender dar una definición estricta se observa que las más habituales incluyen los aspectos siguientes:

- adquisición de la información sin tener contacto material con el objeto observado;

- sensores (instrumentos susceptibles de captar la radiación electromagnética) a bordo de plataformas espaciales o aerotransportadas que observan y adquieren las imágenes;
- se registra la radiación electromagnética;
- se transforman los datos obtenidos en información útil por medio de las técnicas de interpretación y reconocimiento de las superficies.

Algunas de las definiciones que se han dado lo caracterizan como registro *de información de un objeto sin entrar en contacto material con él en las regiones del ultravioleta, visible, infrarrojo y microondas, por medio de instrumentos como escáneres y cámaras localizadas en plataformas móviles (un avión o satélite) y el análisis de la información adquirida por medio de técnicas de fotointerpretación, interpretación de imágenes y procesado de las mismas* (Sabins, 1987).

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 reflejada 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.

La radiación electromagnética es considerada como una forma de energía propagada por un medio. A esta energía se la denomina *energía radiante* y a su propagación por un medio se le conoce por *radiación electromagnética*. La energía radiante se nos pone de manifiesto mediante su interacción con un medio material, de tal manera que, si la interacción no tiene lugar, la energía radiante no es detectable y no podemos obtener información de ella.

2.2.2. Fundamento de la teledetección para la obtención del dato.

La radiación electromagnética queda analizada bajo la teoría ondulatoria como modelo de propagación y bajo la teoría cuántica como modelo de interacción con la materia.

Ahora bien, experimentalmente el comportamiento de la radiación electromagnética permite clasificarlas en bandas o zonas de comportamiento uniforme, estas bandas forman el conocido espectro electromagnético (Schowengert, 1997).

Para poder estudiar el comportamiento de las superficies naturales debemos previamente analizar unas superficies patrón que servirán de modelo de comparación. La respuesta que ofrece un elemento natural a la incidencia de una radiación electromagnética, es el resultado de su propio balance de energía, siendo los coeficientes adimensionales de: reflectividad, absorptividad y transmisividad los que nos permitirán diferenciar el objeto.

La atmósfera (Richards, 1999) interviene en el proceso de la transmisión, como cuerpo natural que interfiere con la radiación modificando la señal, esta modificación recibe el nombre de atenuación. Conocer el comportamiento de la atmósfera nos permite disminuir o corregir el efecto de atenuación.

2.2.3. Magnitudes radiométricas

Las magnitudes que permiten medir la radiación electromagnética reciben el nombre de magnitudes radiométricas, del mismo modo, los instrumentos capaces de registrar y medir la radiación son llamados radiómetros. La terminología que se expone se ajusta a las normas dadas por la **American Standards Institute (ANSI)** y por la **Comisión Internationale de L'Eclairage (CIE)**.

La energía radiante transportada por las ondas genera flujos e intensidades al incidir en superficies concretas. Algunas de las magnitudes radiométricas relacionadas con la intensidad de la radiación son las siguientes:

- A. Flujo radiante o flujo energético (ϕ_r): energía radiada desde un objeto o superficie por unidad de tiempo. Se mide en watos (w).

$$\phi_r = \frac{dQ}{dt} \quad \text{[II-1]}$$

- B. Intensidad radiante o energética ($d\bar{I}_r$): se define como el flujo radiante emitido desde un punto emisor "P" en un ángulo sólido $d\Omega$ (Figura 5) y viene dado por la siguiente expresión:

$$d\bar{I}_r = \frac{d\phi}{d\Omega} \quad \text{[II-2]}$$

y sus unidades son: *Watos/Estereorradianes*.



Figura 1: Flujo emitido desde un punto P

- C. Intensidad específica de la radiación (J_r): si el centro del emisor no es un punto sino un elemento superficial dA , se define la Intensidad específica de radiación como el cociente entre la Intensidad energética y el elemento de superficie en esa dirección

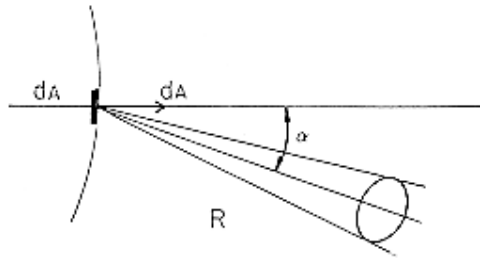


Figura 2: Flujo emitido desde un elemento de superficie dA

$$dW = J_r dA dt \frac{1}{2} \int_0^{\pi} 2 \operatorname{sen} \alpha \cos \alpha d\alpha \int_0^{2\pi} d\theta = J_r dA dt \pi \quad [\text{II-3}]$$

y se mide en *Wattios / Estereorradianes · m*.

Para estudiar la energía radiada en todas las direcciones, una forma es realizar el análisis en coordenadas esféricas

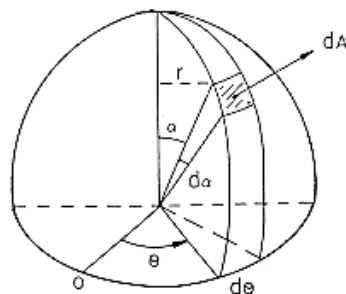


Figura 3: Energía irradiada en todas las direcciones

La expresión [II-3] se tendría que integrar en un ángulo sólido que ocupase el semiespacio obteniéndose una expresión en la forma:

$$dW = J_r \, dA \, dt \, \frac{1}{2} \int_0^{\pi/2} 2 \operatorname{sen} \alpha \cos \alpha \, d\alpha \int_0^{2\pi} d\theta = J_r \, dA \, dt \, \pi \quad \text{[II-4]}$$

ya que

$$dA' = R^2 \cdot \operatorname{sen} \alpha \cdot d\alpha \cdot d\theta$$

$$d\Omega = \frac{dA'}{R^2} = \operatorname{sen} \alpha \cdot d\alpha \cdot d\theta$$

$$dW = J_r \cdot dA \cdot dt \cdot \operatorname{sen} \alpha \cdot \operatorname{sen} \theta \cdot d\alpha \cdot d\theta$$

y representa la energía radiada, por unidad en superficie, en la unidad de tiempo, en todas las direcciones.

$$d\Omega = \frac{dA'}{R^2}$$

$$J_r = \frac{dI}{dA \cos \alpha} = \frac{d\phi}{d\Omega \, dA \cos \alpha}$$

$$J_r = \frac{dW}{d\Omega \, dA \cos \alpha \, dt}$$

Si la intensidad no depende de la dirección (condiciones Lambert), el flujo elemental, por unidad de área será:

$$d\phi_r = \frac{dW}{dt} = \pi \cdot J_r \cdot dA$$

y el flujo solar:

$$\phi_r = J_r \cdot \pi \cdot A$$

Radiancia (L): se define como la intensidad radiante o energética emitida desde una fuente superficial en una determinada dirección por unidad de área proyectada perpendicularmente a esa dirección. Se mide en $Wattios / Estereorradianes \cdot m^2$

$$L = \frac{dI}{dA} \cos i \quad \text{[II-5]}$$

siendo i ángulo de incidencia, es decir, el formado por la normal a la superficie radiante y la dirección considerada.

Se podría expresar como el flujo por unidad de superficie de manera que:

$$L = \frac{\phi_r}{A} = \pi J_r$$

El problema es que aún en el caso en que la superficie es lambertiana el planteamiento sólo es válido para radiaciones monocromáticas. Luego el planteamiento general debe hacerse para cada frecuencia y cada dirección (Figura 8).

Se dice superficie lambertiana a aquella superficie que es independiente de la dirección de emisión como puede observarse en la figura que se adjunta.

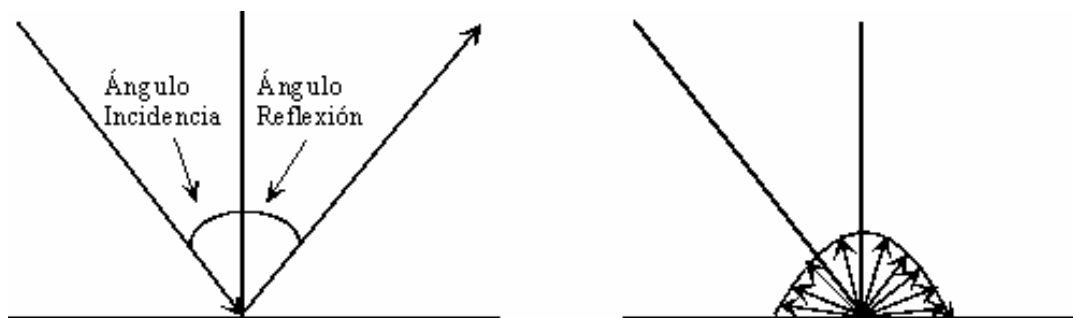


Figura 4: Superficie especular y lambertiana

D. Coeficiente de emisión (ϵ_v):

Es una función que depende de cada sustancia, del medio, de la frecuencia " ν " y de la temperatura (Figura 22) y cuya expresión viene dada por:

$$\varepsilon_v = \frac{dW}{dV d\Omega dt dv} \quad \text{[II-6]}$$

Si se integrase para todas las frecuencias la expresión [II-6] se obtendría el coeficiente de emisión medio.

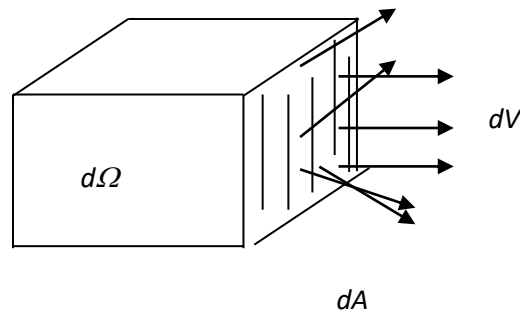


Figura 5: Emisión de una superficie en función del ángulo sólido

E. Coefficiente de absorbanza (α_v):

La energía radiante al atravesar un medio, tendrá una pérdida que será función del medio, de la energía, del espesor del medio y de la frecuencia.

$$\alpha_v = \frac{-dW_v}{W_v dx} \quad \text{[II-7]}$$

$$\frac{dW_v}{W_v} = -\alpha_v dx \Rightarrow \ln \frac{W_v}{W_{0v}} = -\alpha_v x$$

donde

$$W_v = W_{0v} e^{-\alpha_v x} \quad \text{[II-8]}$$

con

W_{0v} = energía incidente de frecuencia " ν "

W_v = energía transmitida

α_v = coeficiente de absorción para esa frecuencia

representa a la **Ley de Beer**.

Si se integrase la expresión [II-8] por todas las frecuencias se obtendría el coeficiente de absorción medio.

F. Emitancia (emisividad):

La relación entre la radiación emitida por la superficie de un cuerpo y la emitida por el cuerpo negro a la misma temperatura es lo que se conoce como emitancia o emisividad. Para los denominados cuerpos grises se llama *emisividad* o *poder emisivo*.

G. Transmitancia:

Es la relación entre la energía transmitida a través de un cuerpo respecto de la energía incidente sobre él. Cuando se refiere a un espesor unidad se denomina *transmisividad*.

H. Reflectancia o Factor de Reflexión:

Medida de la capacidad de una superficie para reflejar energía, siendo la relación de la energía reflejada respecto del incidente. Depende de la naturaleza de la superficie, del ángulo de incidencia y del ángulo de observación. (En el cuerpo negro $r_v = 0$)

$$r_v = \frac{W_r'}{W_r} \quad \text{[II-9]}$$

I. Poder absorbente:

Medida de la capacidad de una superficie para absorber energía, a menudo a longitudes de onda especificadas

$$A_v = l - r_v$$

en un cuerpo negro

$$A_v = l$$

2.2.4. El espectro electromagnético

La radiación electromagnética que se propaga según el modelo matemático de Maxwell no plantea ningún condicionante o límite a los valores que adopte la longitud de onda ($0,00 \text{ \AA} - \infty \text{ m}$), la sucesión ordenada de sus valores (λ) es el denominado espectro electromagnético.

No todo el espectro es asequible experimentalmente ni observacionalmente, el espectro experimentalmente investigado hasta la fecha se extiende de forma continua de longitudes de onda y frecuencias, desde las bajas frecuencias y largas longitudes de las ondas

de radio ($\lambda = 3 \times 10^4$ m) hasta las altas frecuencias y bajas longitudes de onda de los rayos gamma ($\lambda = 3 \times 10^{-6}$ m), de altísima energía radiante.

En el espectro se establecen una serie de bandas o regiones, originadas porque la radiación tiene en ellas un comportamiento similar por su origen y en su interacción con la materia. Cada banda queda definida por sus límites en los valores de longitud de onda: anchura de la banda.

- **Los rayos X: (300 – 0,3 Å)**, junto con los rayos gamma ($<0,3$ Å) se han utilizado en menor medida debido a la opacidad atmosférica. Su utilización se ha limitado a plataformas de vuelo de baja altura o al estudio de superficies sin atmósfera
- **Visible: (0,4 – 0,7 μm)**, es la única radiación perceptible por el ojo humano, también denominado “luz blanca” obedeciendo a la composición aditiva de colores. Se distinguen tres bandas elementales o submilimétricas:

azul (B) (0,4 – 0,5 μm)

verde (G) (0,5 – 0,6 μm)

rojo (R) (0,6 – 0,7 μm)

En esta región juega un papel determinante la energía de los niveles electrónicos, de manera que el salto de un nivel a otro nivel por parte de los electrones produce o absorbe este tipo de radiación.

- **Infrarrojo: (0,7 μm – 1 mm)**, en esta región se produce gran parte de la radiación debida a las rotaciones y vibraciones moleculares, se utiliza para detección remota, espectrometría, polarimetría y láseres. Se divide en tres bandas submilimétricas denominadas:

Infrarrojo próximo (IC): (0,7 – 1,3 μm), también llamado reflejado, cercano o fotográfico, se detecta a partir de emulsiones fotográficas especiales. Importante para discriminación de masas vegetales y concentraciones de humedades en el terreno.

Infrarrojo medio (IM): (1,3 – 8,0 μm), se encuentran entremezclados los procesos de reflexión de la luz y de emisión de la superficie terrestre.

- Infrarrojo lejano o térmico (IT): (8,0 μm – 1 mm), incluye la parte emisiva de la superficie terrestre.

- **Microondas: (1 mm – 10 cm)**, la mayor parte de las interacciones están regidas por rotaciones moleculares, particularmente en longitudes de onda más corta. Esta región es la más empleada por sensores activos (generan la radiación que observan), tales como radares.
- **Radio: (> 10 cm)**, esta región se utiliza por radares, altímetros, sondas y en menor grado por sensores pasivos.

El rango del espectro comprendido entre 0,3 y 14,0 μm , que agrupa varias de las bandas anteriores, recibe el nombre de región óptica del espectro; y la zona de estudio para la presente aplicación se ha centrado entre 0,3 y 1 μm .

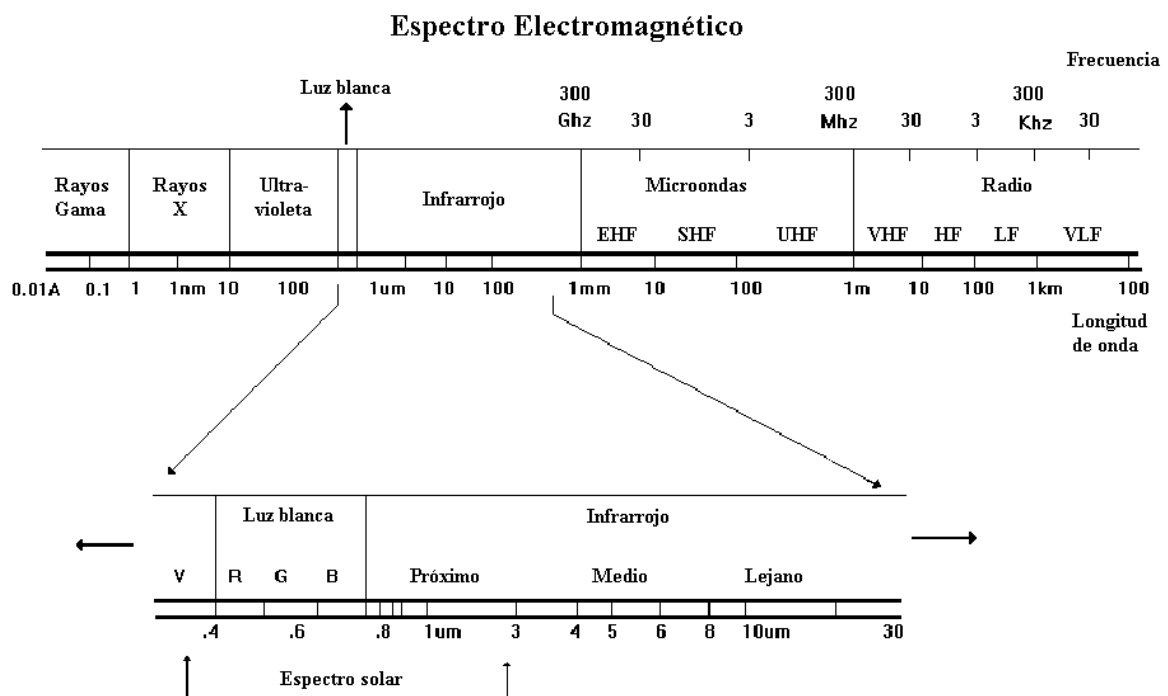


Figura 20: El espectro electromagnético.

2.2.5. Respuestas de la superficie a la radiación

Una superficie difusora refleja y difunde en todas direcciones un haz de rayos incidentes paralelos, de forma que las leyes de reflexión no llegan a describir completamente la interacción electromagnética con la superficie.

Lambert definió como superficies perfectamente difusoras (superficies Lambertianas), como aquellas en las que la radiancia (L) es constante para cualquier ángulo de reflexión (V').

$$\begin{aligned}
 L(V') &= L(0) \\
 \frac{dI(V')}{dA \times \cos V'} &= \frac{dI(0)}{dA} \\
 I(\theta') &= I(0) \times \cos V'
 \end{aligned}
 \tag{II-10}$$

Expresión que se conoce como la ley del coseno, por la cual se deduce que, para una superficie perfectamente difusora, la intensidad emitida en cualquier dirección varía con el coseno del ángulo respecto a la normal a la superficie. Pocos objetos naturales tienen superficies especulares, es decir espejos que obedezcan las leyes conocidas de la reflexión especular (como podría ser la superficie de una masa de agua en reposo). Las superficies naturales se aproximan más a las superficies Lambertianas, como se representa en la figura III. Por ello es importante encontrar relaciones que ligen la emitancia con la radiancia.

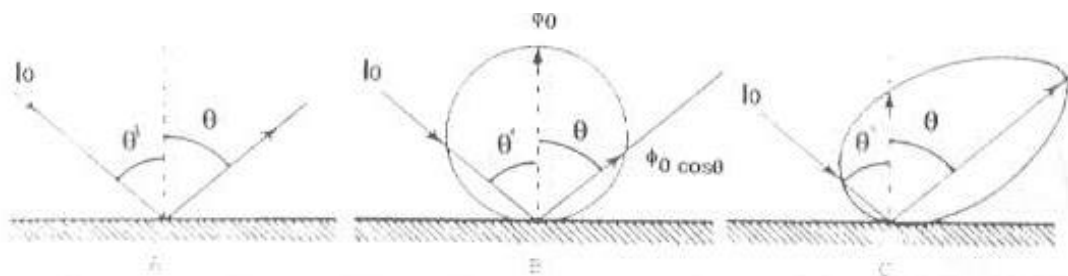


Figura 6: Ley del coseno

Imaginemos un elemento de área (dA) situado en el plano horizontal tangente a la superficie terrestre, que actúa como cuerpo reflector de energía electromagnética. En base a las expresiones anteriores podemos obtener la que nos informa del flujo total hemisférico difundido por ese elemento:

$$d^2\phi(V', \theta') = L(V', \theta') \times d\Omega \times dA \times \cos V'$$

Por la ley del coseno al ser dA , una superficie Lambertiana :

$$L(V', \theta') = L(0) = L$$

$$d^2\phi(V', \theta') = L \times d\Omega \times dA \times \cos V'$$

$$d\Omega = \frac{dS'}{r^2}$$

$$dS' = r^2 \times \text{sen } V' \times dV' \times d\theta'$$

$$d\Omega = \text{sen } V' \times dV' \times d\theta'$$

$$d^2\phi(V', \theta') = L \times \text{sen } V' \times dV' \times d\theta' \times dA \times \cos V'$$

$$d\phi_h = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} d^2\phi(V', \theta') = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} L \times dA \times \text{sen } V' \times \cos V' \times d\theta' \times dV' = L \times dA \times \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} \text{sen } V' \times \cos V' \times d\theta' \times dV'$$

Quedando la sencilla expresión final de:

$$d\phi_h = \Pi \times L \times dA \quad \text{[II-11]}$$

obsérvese que se mantiene como elemento diferencial de flujo al estar analizado respecto el valor diferencial de la unidad de área.

Si definimos la reflectividad (ρ) hemisférica difusa, como la relación entre el flujo reflejado por la superficie y el incidente que a ella le llega:

$$\rho_h = \frac{d\phi_h}{d\phi_i} \quad \text{[II-12]}$$

donde ϕ_i , no es más que la totalidad del flujo incidente sobre la unidad de superficie para todos los ángulos V' y θ' (considerado todo el hemisferio).

$$E(V, \theta) = \left(\frac{d\phi(V, \theta)}{dA} \right) \rightarrow E = \frac{d\phi_i}{dA}$$

$$\rho_h = \frac{\Pi \times L \times dA}{E \times dA} = \frac{\Pi \times L}{E}$$

$$M = \frac{d\phi_h}{dA} \rightarrow d\phi_h = M \times dA$$

[II-13]

$$\rho_h = \frac{M \times dA}{E \times dA} = \frac{M}{E}$$

$$\frac{\Pi \times L}{E} = \frac{M}{E} \Rightarrow M = \Pi \times L$$

$$\rho_h = \frac{M}{E}$$

Sencilla expresión que relaciona el comportamiento de la unidad de superficie ante una energía incidente y la energía reflejada a todo el hemisferio.

Muchas superficies naturales se comportan como Lambertianas hasta unos ángulos cenitales de 40º y algunas como la nieve y desiertos hasta los 50º y 60º. La mayoría discrepan para ángulos cenitales mayores. Respecto al ángulo acimutal, la radiancia presenta pocas variaciones, aunque existen excepciones tales como cultivos con plantas en filas y superficies de asentamientos urbanos.

Cuando no podemos asumir el comportamiento Lambertiano de una superficie natural, la expresión de la emitancia hemisférica de la unidad de superficie queda según la forma general:

$$M = \frac{d\phi_h}{dA}$$

$$d\phi_h = dA \times \int_0^{\frac{\Pi}{2}} \int_0^{2\Pi} L(V', \theta') \times \text{sen}V' \times \text{cos}V' \times d\theta' \times dV'$$

[II-14]

$$M = \int_0^{\frac{\Pi}{2}} \int_0^{2\Pi} L(V', \theta') \times \text{sen}V' \times \text{cos}V' \times d\theta' \times dV'$$

Expresión que presenta dificultades incluso en laboratorio para obtener los valores para los diferentes ángulos cenitales y acimutales. Esta situación se corrige con referencias de las superficies naturales respecto a superficies patrones o de referencia que si son

superficies Lambertianas. Se han propuesto tres factores o funciones que relacionan ambas superficies:

- Función de distribución de reflectividad bidireccional (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*, B.R.D.F)
- Reflectividad bidireccional (*Bidirectional Reflectance*, B.R.)
- Factor de reflectividad bidireccional (*Bidirectional Reflectance Factor*, B.R.F.)

De ellas, son muy empleadas la primera y la tercera:

B.R.D.F.:

Normalmente designada con el símbolo (f) y que se define como:

$$f(V, \theta, V', \theta') = \frac{dL(V, \theta)}{dE(V', \theta')} \quad \text{[II-15]}$$

B.R.F.:

Normalmente designada con el símbolo (R) y se define como la relación entre el flujo reflejado por una superficie natural, bajo determinadas condiciones de irradiación y de observación y el de una superficie patrón perfectamente difusora y totalmente reflectante², en idénticas condiciones de irradiación y de observación.

$$R(V, \theta, V', \theta') = \frac{(dL(V, \theta, V', \theta'))_{natural}}{(dL)_{patron}}$$

Para la superficie de referencia según la expresión (12):

$$M = \Pi \times L$$

$$dM = \Pi \times dL$$

$$\rho_h = \frac{M}{E} \rightarrow M = E$$

Por lo tanto, el B.R.D.F. de la superficie patrón quedará:

² Su reflectividad hemisférica es la unidad (emitancia igual a radiancia)

$$f_{patron}(V, \theta, V', \theta') = \frac{dL}{dE} = \frac{1}{\Pi}$$

Resultando el B.R.F:

$$R(V, \theta, V', \theta') = \frac{f_{natural}(V, \theta, V', \theta') \times dE}{f_{patron} \times dE} = \Pi \times f_{natural}(V, \theta, V', \theta') \quad \text{[II-16]}$$

Que de una forma más sencilla que la expresión general (II-43), nos permite conocer la irradiancia de la superficie natural.

Es importante recordar el comportamiento espectral de la radiación y por tanto todos y cada uno de las magnitudes radiométricas antes expuestas deberán venir referenciadas a la longitud de onda en la que se cuantifica la magnitud. De forma general este comportamiento espectral viene con una simbología de (λ) como subíndice y las unidades con el único sentido informativo añaden (μm). Un ejemplo de lo expuesto se aplica para la emitancia a una determinada longitud de onda:

$$M_{\lambda}(V') = \left(\frac{d\phi_{\lambda}(V')}{dA} \right)_{emidido} \quad (\text{w x m}^{-2} \times \mu\text{m}^{-1})$$

2.2.6. Constituyentes atmosféricos

Para describir los fenómenos que la radiación experimenta en su paso a través de la atmósfera existente en la cueva, es necesario conocer su composición y aquellas propiedades que pueden influir en su transferencia.

Desde el punto de vista de la transferencia, la atmósfera la forma tres grupos de componentes: los gases permanentes, los de composición variable y los aerosoles.

Cuando se trabaja a objeto cercano, la composición queda integrada por cuatro componentes mayoritarios en unas proporciones que se mantienen básicamente constantes:

Tabla 1: Componentes mayoritarios de la atmósfera

Componentes	Porcentaje (% volumen)
N ₂	78,084
O ₂	20,984
Ar	0,943
CO ₂	0,033
Total	99,999

Otros componentes generalmente son de composición variable, clasificados como minoritarios, por las bajas concentraciones en las que se presentan, son:

Tabla 2: Componentes minoritarios de la atmósfera

Componentes	Concentraciones (ppm)
vapor de agua	1 – 40.000
ozono	10 ⁻² – 1
monóxido de carbono	2 – 300
anhídrido sulfuroso	10 ⁻³ – 4
óxido nitroso	0,5 – 5,3
monóxido de nitrógeno	0,02 – 4
dióxido de nitrógeno	0,03 – 0,2
amoniaco	0,02 - 3

Por último, se consideran los aerosoles, esto son la materia sólida o líquida que se encuentra en suspensión en el aire. Para poder estimar el efecto de los aerosoles en la transferencia de la radiación deben de conocerse sus características físicas y químicas. Ellas dependen de cuál es el origen de los aerosoles, el proceso de formación o de agrupamiento, los efectos atmosféricos sobre ellos y el proceso de su eliminación o desaparición.

Las principales fuentes de formación de los aerosoles atmosféricos, aunque muy diversas, son clasificadas en fuentes naturales y artificiales.

Fuentes naturales: erosión del paramento, materiales biológicos (polen, esporas, hongos y bacterias) y los procesos de condensación (nubes y nieblas).

Fuentes artificiales: las relacionadas con la actividad del hombre y los procesos de combustión. Con frecuencia los productos emitidos tanto en las actividades industriales como en los productos de combustión, inician en la atmósfera reacciones químicas dando lugar a nuevos aerosoles. No están presentes en las zonas donde ha actuado.

La diversidad de los orígenes y su inestabilidad en la atmósfera, hace sumamente difícil encontrar magnitudes y relaciones empíricas que describan su comportamiento. Pero al menos podemos disponer de parámetros que definan las características de un aerosol: granulometría, concentración, propiedades ópticas, composición química y carga eléctrica.

2.2.7. La teledetección en cuevas

2.2.7.1. Introducción

La cobertura de las cuevas está formada por diferentes tipos y cada una de ellas responde de una forma específica a la radiación de la luz. Este diferente comportamiento a la radiación nos va a permitir, mediante el análisis del balance de energía reflejada al sensor, diferenciar la naturaleza y los componentes de la superficie.

De forma general y en la fase de introducción en la que nos encontramos, las superficies de las cuevas pueden clasificarse en cuatro grandes grupos: elementos vivos (hongos y bacterias), paramento (tipo de sustrato), pigmento (si lo hubiera) y agua. El agua a su vez puede presentarse sobre la superficie de la Tierra en estado sólido (nieve o hielo), líquido o vapor.

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 ecuación del balance de energía nos permite relacionar estos efectos:

$$\begin{aligned} \phi_{i,\lambda} = \phi_{a,\lambda} + \phi_{t,\lambda} + \phi_{r,\lambda} \rightarrow 1 &= \frac{\phi_{a,\lambda}}{\phi_{i,\lambda}} + \frac{\phi_{t,\lambda}}{\phi_{i,\lambda}} + \frac{\phi_{r,\lambda}}{\phi_{i,\lambda}} \\ &= \left(\frac{\phi_a}{\phi_i} \right)_\lambda + \left(\frac{\phi_t}{\phi_i} \right)_\lambda + \left(\frac{\phi_r}{\phi_i} \right)_\lambda = \alpha_\lambda + \Gamma_\lambda + \rho_\lambda \end{aligned} \quad \text{[II-17]}$$

Dado que nuestro interés se centra en la interacción de la luz con las superficies naturales y en el análisis de los datos que extraen los radiómetros en los rangos entre 0,3 –

2,5 μm , nos centraremos en el comportamiento de la energía reflejada (la que es registrada por el sensor) en el rango antes citado.

La forma más básica de cuantificar la respuesta espectral de una superficie es mediante una representación bivariada adoptándose dos ejes que indica, el primero de ellos la variable de la longitud de onda de la radiación reflejada y el segundo el porcentaje de reflexión. La respuesta es una curva que recibe el nombre de curva de reflectividad de la superficie, también llamada *firma espectral*.

Los suelos, por ejemplo, están compuestos por estratos que presentan diferencias en color, textura (distribución de tamaño de partículas) y estructura (distribución de las partículas). En teledetección el estrato de mayor importancia es el que se ve, es decir, el más superficial, pero es esencial conocer también las propiedades de los estratos más profundos, sobre todo cuando tienen lugar procesos de erosión.

Los suelos desnudos muestran una curva casi horizontal pero que asciende suavemente desde el visible hasta el infrarrojo próximo. La respuesta espectral varía en función de las propiedades físico-químicas que presenta el suelo:

- **composición química:** contenido en materia orgánica y óxido de hierro que influye en el color del suelo y en su reflectividad
- **textura:** el porcentaje de arena, limo o arcilla determina la capacidad de retención del agua y, en consecuencia, la reflectividad es más alta para suelos más finos y apelmazados;
- **contenido de humedad:** los suelos secos son generalmente más brillantes que los suelos húmedos;
- **rugosidad:** todos los factores se relacionan entre sí de manera que, por ejemplo, los suelos arcillosos (poco permeables y de textura fina), tienden a tener alto contenido de humedad lo que implica una reflectividad baja, mientras que los suelos arenosos (muy permeables y de textura grosera) tienden a tener bajo contenido de humedad y, en consecuencia, una alta reflectividad.

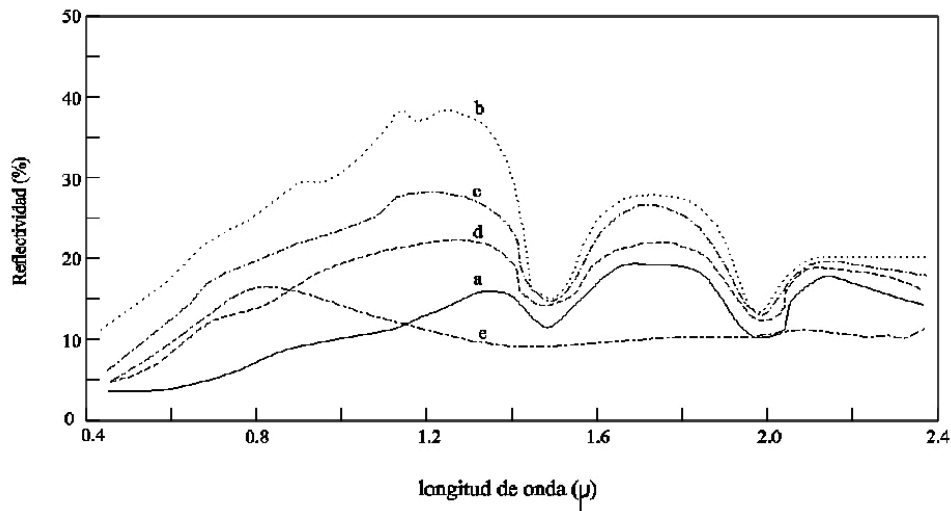


Figura 7: Espectro representativo de cinco tipos de suelo

La humedad del soporte está altamente relacionada con tanto las bacterias como los hongos. Si se realiza un muestreo, suelen mostrar una similitud en la estructura de la comunidad cuando las muestras de comunidades se toman de áreas con un rango similar de humedad, incluso si el sustrato no es el mismo; del mismo modo, sus estructuras son significativamente diferentes, cuando se toman de áreas con diferentes niveles de humedad, incluso si el sustrato es el mismo. Es decir, la estructura de la comunidad es dependiente de la humedad más que del tipo de sustrato.

2.2.7.1. Características que influyen en la respuesta espectral de los paramentos

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, dotándoles de su color característico.

La Microbiología

Dentro de la gran cantidad de bacterias que hay, se sabe que por ejemplo las proteobacterias llevan a cabo reacciones de desnitrificación, con la conversión del amoníaco en óxido nitroso y también juegan un papel en la desnitrificación de compuestos orgánicos complejos, tales como nitrobenceno (Barton *et al.*, 2007).

Algo similar sucede con los hongos como la Penicilina o el *Aspergillus*, que se sabe que solubilizan y mineralizan el fósforo de las piscinas inorgánicas y orgánicas (Van Breemen *et al.*, 2000, Vassilev *et al.*, 1996, Wakelin *et al.*, 2004). Por otro lado, las especies animales como las

amebas se sabe que desempeñan un papel en la diseminación de esporas de hongos y bacterias.

Por ejemplo, en la cueva de Altamira (Jurado *et al.*, 2009), las proteobacterias representaban aproximadamente el 50% de las secuencias identificadas, y sorprendentemente un grupo prácticamente desconocido de microorganismos, las Acidobacterias, representaba casi el 25% del total (Schabereiter-Gurtner *et al.*, 2002). Las Acidobacterias son un grupo bacteriano único, ya que la mayor parte de esta división bacteriana sólo se conoce a partir de las secuencias de rDNA 16S de microorganismos no cultivados (González & Saiz-Jiménez, 2004). Este tipo de estudios hacen difícil establecer patrones sobre el papel ecológico que estos organismos juegan en el medio ambiente.

En general, parece ser que aparte de la dispersión de esporas procedentes del exterior, que penetran mediante las corrientes de aire, dos factores fundamentales son la introducción de hongos asociados a los insectos que penetran desde el exterior, y la presencia de roedores, cuyos excrementos favorecen el crecimiento de hongos y la dispersión en la cueva de conidios (Jurado *et al.*, 2008, 2009).

El incremento del número de conidios de hongos en el aire de una cueva representa un peligro por la capacidad de estos de colonizar cualquier tipo de materia orgánica introducida por las visitas. Por otra parte, el aumento de materia orgánica disponible que supone la presencia de roedores, y la colonización de sus excrementos por hongos, que alimentan a la población de colémbolos y otros insectos, contribuyen igualmente a la dispersión de los hongos (Nováková, 2009) y a la colonización de otros materiales, tanto orgánicos como inorgánicos que puedan ser introducidos en la cueva (Jurado *et al.*, 2009; Bastian *et al.*, 2010).

Los microorganismos juegan un papel importante en los ecosistemas de las cuevas, ya que son capaces de colorear superficies de roca desnudas, utilizar la baja materia orgánica presente en las aguas de goteo e influir en los procesos de cristalización de minerales. (Cañaveras *et al.* 1999) sugirieron que las bacterias presentes en las cuevas pueden desempeñar un papel en la formación de depósitos de *moonmilk*, ya que se encontraron comunidades microbianas predominantemente compuestas de diferentes especies del género *Streptomyces* en asociación con depósitos de hidromagnesita y depósitos de aragonito en la cueva de Altamira.

Hoy en día, debido a que la cueva no es un ambiente uniforme en términos de geología y geoquímica, la correcta gestión de las cuevas tiende a reeducar los impactos antropogénicos controlando los visitantes y el microclima (Hoyos *et al.*, 1998).

En los últimos años se han investigado en detalle varias cuevas que se muestran al público como Altamira, El Castillo, Tito Bustillo, La Garma y las cuevas de Llonin en el norte de España, y Grotta dei Cervi en Porto Badisco, Italia (Groth y Saiz-Jiménez, 1999, Groth *et al.* 1999, 2001, Laiz *et al.*, 1999, 2000).

Se ha documentado que las actinobacterias aisladas de la cueva de Altamira revelaron diversidad taxonómica, con los predominantes aislados pertenecientes al género *Streptomyces*. Miembros de los géneros *Nocardia*, *Rhodococcus*, *Nocardoides*, *Ainyocatopsis*, *Saccharothrix*, *Brevibacterium*, *Microbacterium* y actinobacteria cocinoide (familia *Micrococcaceae*) (Groth *et al.*, 1999). En la cueva de La Garma, descubierta en 1995 y visitada en 1998, se observó un nivel similar de colonización. En ese período sólo se registraron 64 visitantes de la cueva, con un total de 45 horas de estancia. Por lo que la colonización bacteriana parece ser independiente de las visitas.

La diversidad microbiana en cuevas no es posible estudiarla exhaustivamente por enfoques tradicionales. Uno debe ser consciente de que sólo una pequeña fracción de las bacterias existentes en el ecosistema es capaz de crecer en condiciones de laboratorio; mientras que en las cuevas existe una alta diversidad de especies. Actualmente se emplean técnicas genéticas de identificación que ofrecen buenos resultados, si bien puntuales.

En la actualidad todavía no se ha creado un método que estudie en detalle la ecología de la cueva, basándose en las condiciones ambientales de la misma y su exterior y las interacciones entre microorganismos (bacterias y hongos), otros organismos (protozoarios y artrópodos) y la presencia humana.

Materia orgánica

La materia orgánica se puede presentar en aspectos bien diferenciados: materia orgánica constituida por el sistema radical de las plantas y la fauna edáfica, materia orgánica constituyente de los microorganismos del paramento, restos vegetales parcialmente descompuestos en los que aún es perfectamente reconocible su estructura original y el humus (formado por elementos orgánicos difícilmente metabolizables como es el caso de las grasas, ceras y ligninas).

El contenido de materia orgánica decrece con la profundidad. La influencia del contenido en materia orgánica se ejerce fundamentalmente en las capas superiores del paramento y su constatación es importante.

El humus de tipo *mull* es un coloide de tipo hidrófilo que se rodea de una película de agua por lo que se resiste a pasar del estado floculado al disperso, y viceversa, que es lo contrario de lo que sucede con los coloides arcillosos. Esta materia orgánica en estado *mull* aumenta la capacidad de retención de agua del suelo alrededor de un 2% por cada 1% de contenido de materia orgánica.

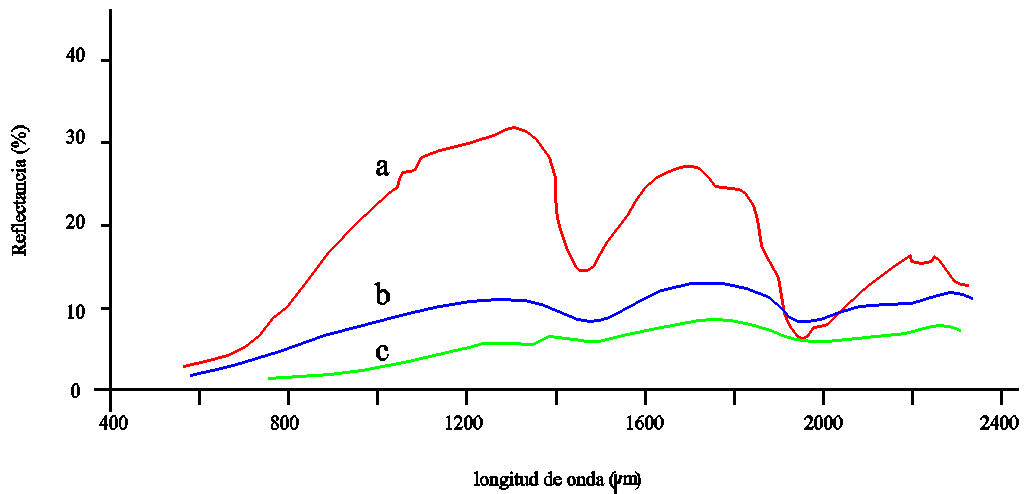


Figura 21: Influencia de la materia orgánica en la reflectividad del paramento: a) mínima descomposición; b) descomposición parcial y c) máxima materia orgánica o descomposición completa.

Textura

La textura de un paramento clasifica su contenido granulométrico y hace referencia al porcentaje de arena, limo o arcilla presente en el mismo. Las diferentes proporciones de estos tipos de partículas sólidas en un suelo determinan su nombre, así se denomina paramento arenoso, limoso o arcilloso según contenga mayor proporción de un tipo u otro y partículas.

Las arenas y los limos están formados por minerales primarios, principalmente cuarzo, feldespatos, micas y silicatos ferromagnéticos. El análisis espectral de los minerales primarios es complejo como consecuencias de las sustituciones isomórficas y la presencia de impurezas. Una sustitución isomórfica permite que en la estructura cristalina de un mineral una posición pueda estar ocupada por átomos diferentes.

En la Figura 22 se muestra la variación de la reflectividad para un mismo tipo de textura de suelo (arcilloso) con contenidos distintos de humedad. Se puede observar cómo las formas de las curvas son similares y se establece la diferencia entre las curvas por disminución de la reflectividad, con desplazamiento de la curva hacia el eje de abscisas, pero sin modificar la forma de la respuesta.

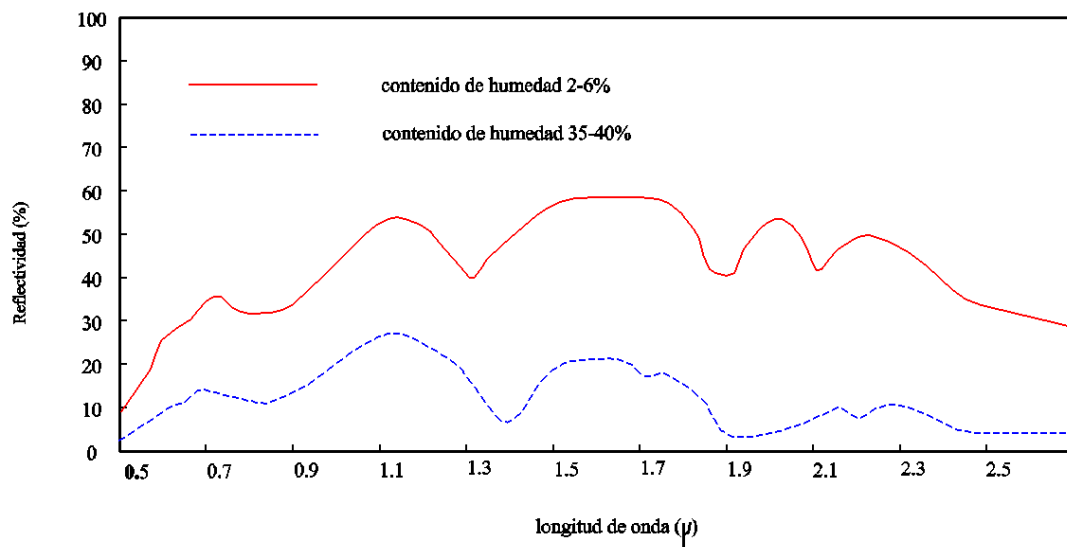


Figura 22: Influencia espectral del suelo arcilloso con distinto contenido de humedad

En el caso de paramentos arenosos no se produce un comportamiento similar al anterior ya que según el grado de humedad las curvas adquieren formas distintas (Figura 13). Un paramento arenoso seco tiene una curva muy regular con mínimos muy poco acusados, de tal forma que al aumentar el contenido de humedad se hacen muy acusadas las bandas de absorción del agua.

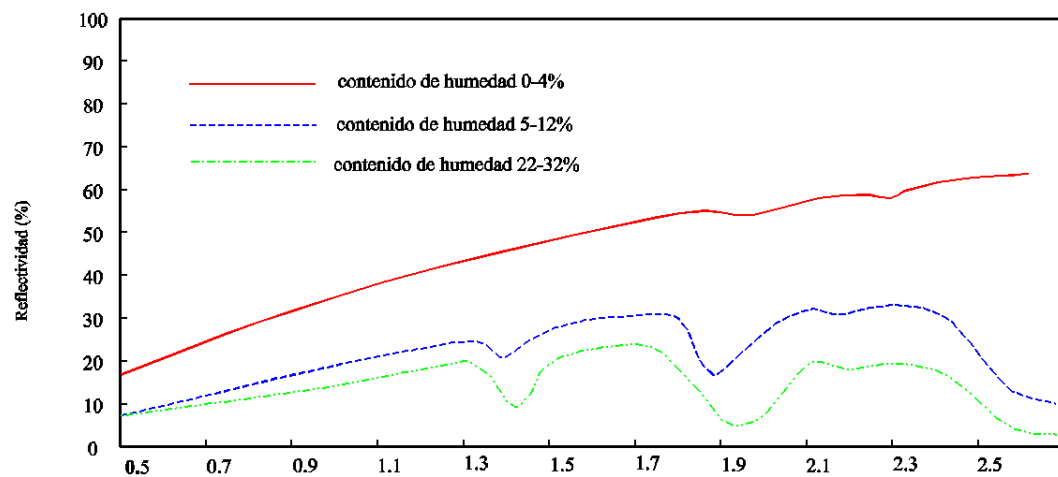


Figura 23: Curva espectral del suelo arenoso con distinto contenido de humedad

La textura juega un papel muy importante en el contenido de humedad de un suelo, puesto que un suelo arcilloso compuesto por partículas de pequeño tamaño, muy unidas entre sí, sin dejar espacios huecos, produce un potencial elevado, es decir, una alta resistencia a la pérdida de agua por drenaje y evaporación, convirtiéndose en suelos difíciles de secar.

Los paramentos arenosos, al estar constituidos por partículas de mayor tamaño que permiten el paso de agua hacia el interior del suelo y el paso del aire (evaporación), su reflectancia se puede suponer independiente de la curva de absorción del agua si la humedad del suelo no es muy grande. Su respuesta comienza a coincidir con la del suelo arcilloso al aumentar la humedad.

La relación existente entre la capacidad de penetración y la humedad del suelo para frecuencias comprendidas entre 10^8 y 10^{11} se observa en la Figura 14.

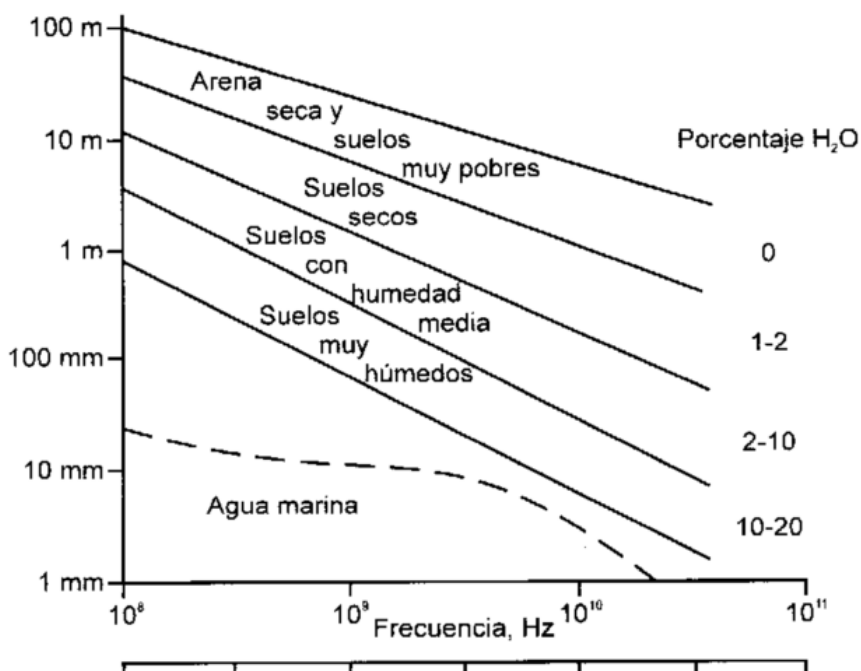


Figura 24: Relación entre la capacidad de penetración y la humedad del suelo

2.7.2.4. El agua

En el momento en que hay agua presente en el suelo, esta se puede subdividir en diversas fracciones dando lugar a las formas de agua siguientes:

- *Agua de escorrentía*: Puede ser superficial o hipodérmica (cuando circula en el interior de los horizontes superiores, paralelamente a la superficie), siendo esta segunda forma el agente causante del empobrecimiento, del arrastre lateral de las

partículas más finas, pigmentos, limos y arcillas; la escorrentía no es constante. Sería el caso del techo de la cueva de Altamira.

- *Aguas de gravitación*: o agua gravitacional, se infiltra por la fuerza de la gravedad y circula por los poros gruesos, superiores a 10 μm , en general verticalmente, aunque a veces también lo hace de forma oblicua si existe una pendiente y cuando la permeabilidad del suelo disminuye en los horizontes profundos [II / 3.1.3]. Este tipo de agua se subdivide en dos tipos:
 - a) *agua gravitacional de flujo rápido*: circula por los poros más gruesos, superiores a 50 μm
 - b) *agua gravitacional de flujo lento*: desciende lentamente (con frecuencia durante varias semanas) por los poros de diámetro comprendido entre 50 y 10 μm
- *Agua retenida*: por el paramento durante la infiltración, que ocupan los poros medios y finos, inferiores a 10 μm aproximadamente; las fuerzas capilares y de absorción son suficientemente grandes para oponerse a la fuerza de gravedad. El agua retenida se subdivide en dos partes:
 - a) *agua capilar absorbible por el medio*: que ocupa los poros medios, donde forma meniscos entre las partículas sólidas
 - b) *agua ligada* (llamada también de absorción) que forma una película fina en la superficie de las partículas del paramento, poros finos, diámetro inferior a 0,2 μm , y que esta retenida por el paramento o por bacterias tan enérgicamente que no es absorbible.

La capacidad de almacenamiento de agua de un paramento varía según la cantidad y tamaño de sus poros y, por tanto, según su textura, estructura y contenido de materia orgánica.

2.7.3. Características que influyen en la respuesta espectral de la vegetación

En la figura de abajo, se muestra la curva de reflectividad típica de la vegetación sana, se puede observar las regiones espectrales más significativas de ella y las causas o parámetros predominantes de la forma de la curva para distintas longitudes de onda.

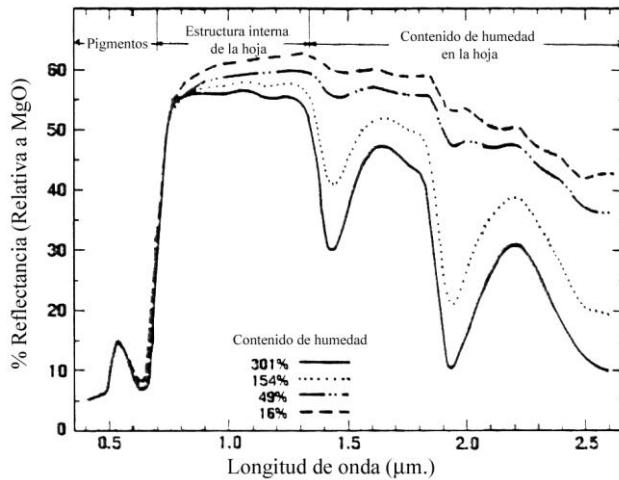


Figura 25: Curva de reflectividad de la vegetación sana

A la Vista de la figura, se pueden observar los tres dominios espectrales siguientes:

- Visible (VIS): (0,4 – 0,7 μm), aquí la reflectividad es inferior al 15%. La mayor parte de la radiación es absorbida por la clorofila ($\alpha_{\lambda} = 65\%$), que debido a sus bandas de absorción produce dos mínimos de banda del azul (0,45 μm) y del rojo (0,66 μm). Por eso las hojas parecen para el observador natural verdes, ya que su máximo relativo está en 0,55 μm (vegetación amarilla – verde)
- Infrarrojo próximo (PIR): (0,7 – 1,3 μm), en este intervalo de longitudes de onda donde se absorbe muy poca radiación incidente ($\alpha_{\lambda} = 10\%$), debido a que los pigmentos foliares y la celulosa que constituye las paredes celulares son transparentes. La radiación incidente es por tanto reflejada o transmitida, la reflectividad pasa rápidamente de 1% a más del 50%
- Infrarrojo medio (MIR): (1,3 – 2,2 μm), esta zona se denomina hídrica, ya que en las propiedades ópticas de las hojas vienen determinadas principalmente por su contenido en agua. Más allá de los 1,3 μm , existen fuertes bandas de absorción debidas al agua (1,45, 1,95 y 2,5 μm). Aparece un máximo hacia 1,6 μm (inferior al de 0,7 μm) seguido del mínimo a 1,95 μm (inferior al de 1,45 μm), un nuevo mínimo a 2,5 μm (inferior también al de 1,95 μm) y una casi desaparición de la reflectividad a partir de estas longitudes de onda.

Un análisis combinado para los rangos de longitudes de onda anteriores de los tres componentes del balance de energía puede observarse en la figura de abajo para la vegetación sana.

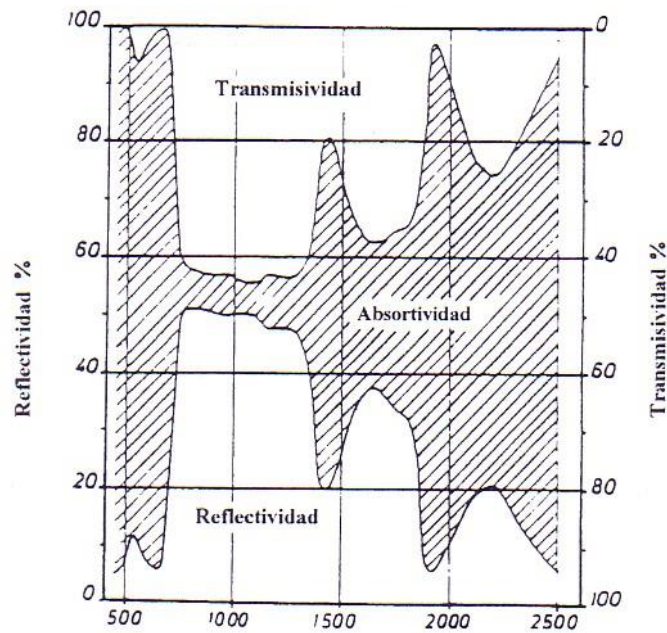


Figura 26: Espectros de reflectividad, absorptividad y de transmisividad

Como se puede observar los ejes están graduados en sentido inverso, representando la zona sombreada la componente de absorptividad.

Este comportamiento que se puede considerar como típico, puede sufrir variaciones en función de los factores que afectan a las propiedades espectrales de las hojas y entre los que destacan:

- La estructura anatómica de la hoja/hongo.
- Su edad, que hace que desaparezca la clorofila y por tanto que aumente la reflectividad en el amarillo y el rojo.
- El contenido en agua de las hojas, lo que implica que en condiciones de estrés hídrico se produzca un incremento de reflectividad que es más acusado en el (VIS) y (PIR).
- Las deficiencias en minerales, que afectan a la fijación y tenencia de la clorofila y a la correcta estructura anatómica de la hoja.

- Los ataques de los parásitos y enfermedades víricas, que modifican la concentración de los pigmentos, general necrosis y cambios de estructura y por lo tanto modificaciones en la reflectividad.

Como conclusiones del análisis de la signatura espectral de una sola hoja de vegetación sana podemos exponer:

- I. La reflectividad es muy baja en las zonas del espectro visible correspondientes al azul y al rojo. La razón se encuentra en el contenido de clorofila de la hoja y los máximos de absorción que la clorofila origina en esas longitudes de onda. El resultado de esto máximos de absorción en la banda del visible genera un máximo relativo de reflectividad en la zona del verde, siendo este máximo el responsable de que en observación normal (nuestros ojos) la vegetación sana se aparezca de este color.
- II. Cuando la vegetación está sometida a un estrés hídrico o a una tensión de cualquier otra tipología (enfermedad, agostamiento, virosis, etc.), la concentración de clorofila en la planta disminuye y la curva de reflectividad ve modificadas los máximos de absorción, mostrando una respuesta espectral en la banda del visible con una pendiente más o menos uniforme y exenta de máximos y mínimos relativos.
- III. Otros pigmentos además de la clorofila son responsables de la forma de la curva espectral: son los carotenos y las xantofilas (ambos pigmentos amarillos) y las antocianinas (pigmentos rojos). Los primeros están presentes a menudo en la vegetación sana con bandas de absorción en la región azul (aprox. $0,45\mu\text{m}$). Dado que la clorofila también absorbe a esa longitud de onda, cuando está presente enmascara a los carotenos y a las xantofilas. Sin embargo, en condiciones de estrés la disminución de clorofila hace dominante los otros pigmentos que son los responsables de la percepción de la coloración amarilla, como ejemplo la adquirida por la vegetación agostada (especies caducas) en otoño.
- IV. Es significativo el alto incremento de reflectividad que se produce en la región del infrarrojo próximo ($>0,7\mu\text{m}$), donde la ecuación del balance de energía adopta un comportamiento cercano a los valores siguientes:

Reflectividad (45 – 50) %

Transmisividad (45 – 50) %

Absortividad.

5%

La razón de esta importante pérdida de absortividad obedece a la estructura interna de la hoja (ver Figura posterior). Las hojas de los vegetales tienen una estructura que varía según la familia; el mesófilo, que son células de forma irregular que forman una capa con grandes espacios intercelulares, es el principal responsable y el que permite con sus espacios intercelulares ocupados por aire y agua, tener grados de comportamiento diferenciado de absortividad para las diferentes especies vegetales, incluso para una misma especie en edades distintas.

- V. En el (MIR), la respuesta espectral viene determinada por el contenido en agua. Las fuertes bandas de absorción del agua en las longitudes de onda de 1,45, 1,95 y 2,5 μm , hacen que la vegetación pase por unos mínimos de reflectividad en dichos intervalos de longitud de onda.

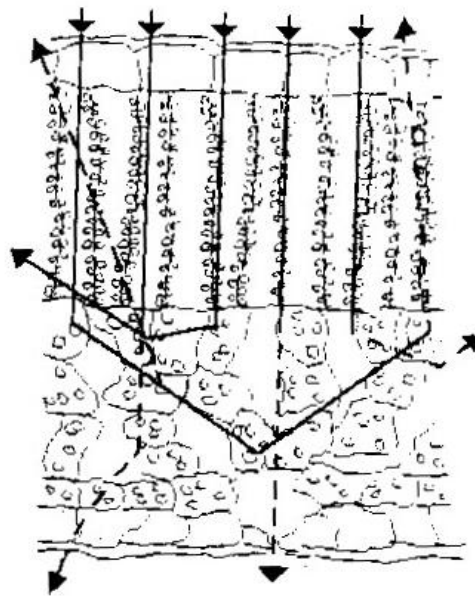


Figura 27: Estructura de la hoja

2.3. Características de las fuentes de luz

Las fuentes de luz pueden ser naturales o artificiales. La fuente natural es el sol, del que la tierra recibe, bajo la forma de calor y luz, los rayos filtrados con las diferentes capas de la atmósfera. Es una luz inestable, sujeta a considerables variaciones, a veces incluso en un periodo de tiempo muy breve. Así, la luz es más roja en invierno que en verano, más rosada por la mañana y por la noche que durante el día, en que es blanca o incluso azulada, sobre todo al mediodía, cuando el sol está en su cenit, sin embargo, esta es la mejor luz, la que nos muestra las cosas como realmente son.

Las fuentes de luz artificiales, constantemente mejoradas son de dos tipos:

- Fuentes de luz por combustión que van desde el fuego de leña hasta las lámparas de petróleo y de gas, pasando por las lámparas de aceite, tuétano de los huesos, antorchas, los candelabros, las velas... Se caracterizan por una llama directa o indirectamente (por medio de una mecha más o menos regulable), procede de la combustión de sustancias animales, vegetales o minerales. Es una luz difícil de regular, como también de evitar este humo tizna y limitar los riesgos de incendio. Son las fuentes que se emplearon para pintar el arte rupestre.

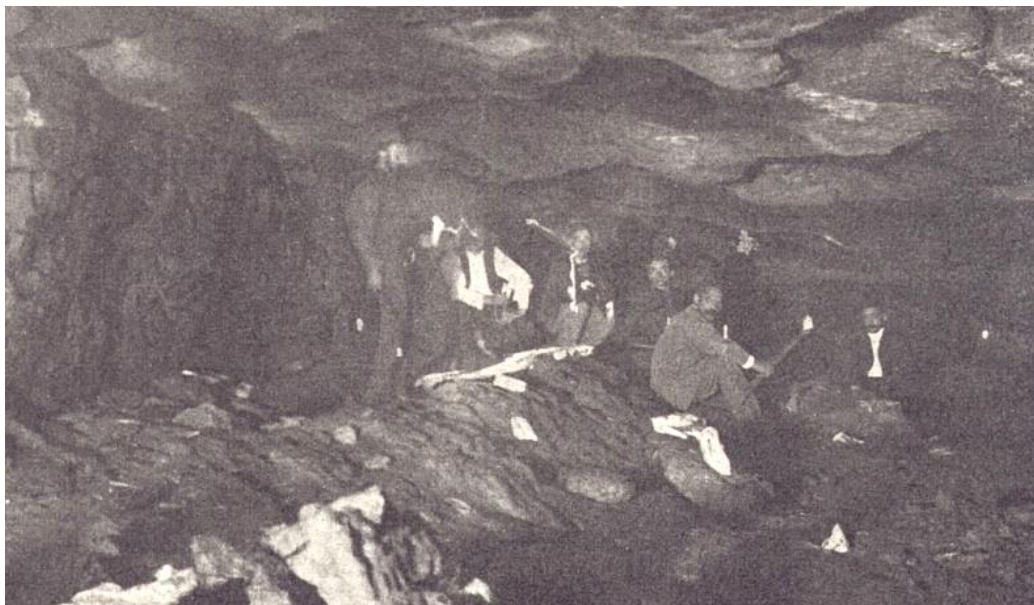


Figura 28: Gente visitando la cueva de Altamira en 1902 con antorchas. (Fuente: Museo de Altamira)



Figura 29: Alberto de Mónaco con vela de cera de abeja y H. Breuil con lámpara de gas de acetileno en la visita a la cueva de El Castillo de junio de 1909. Extraída de (Alcalde del Río *et al*, 1911).

- Luz eléctrica, nació en un laboratorio en el siglo XVIII. En 1861, La Roche-sur-Forón, en Saboya, fue la primera ciudad de Francia alumbrada por la electricidad; en 1879 Thomas Edison inventó la bombilla incandescente con filamentos de carbono, y en 1938 hizo su aparición la lámpara fluorescente. Como elemento primordial de la revolución industrial, la luz eléctrica cambia completamente las condiciones de vida de la humanidad.



Figura 30: Instalación de luz eléctrica fluorescente en la Cueva de Altamira (Lasheras, *et al*, 2014).

A lo largo de la historia se han empleado diferentes sistemas de iluminación en las visitas de las cuevas. Si tomamos como referencia la cueva de Altamira:

Tabla 3: Iluminación en la visitas de las cuevas a lo largo de la historia

Año	Descripción
1880-1905	Antorchas y velas de cera de abeja (solas o en candeleras).
1905	Iluminación fija de gas acetileno
1931	Instalación eléctrica de tipo incandescente
1957	Instalación eléctrica de tipo fluorescente: Sala de Policromos: 17 lámparas fluorescentes con distintas potencias y temperaturas de color. /10 lux como valor medio; puntos máximos menores de 20 lux / 435 w de potencia instalada Cueva: 150 lámparas de fluorescencia / 4500 w de potencia instalada
1969	Instalación de filtros ultravioleta en los tubos fluorescentes. No consta cuanto tiempo permanecieron instalados.
1993	Desmantelamiento de la instalación eléctrica de 1957.
1993	Desmantelamiento de los camuflajes contruidos con piedra, ladrillos y uralitas para la instalación eléctrica de 1957.

1993	Limpieza de colonias de algas en los bordes de los fluorescentes del suelo.
1993-94	<p>Nueva instalación eléctrica y de iluminación de fluorescencia compacta instalada sobre carriles de aluminio. Se encendía por tramos, durante la visita pública.</p> <p>Sala de Policromos: 12 lámparas fluorescentes de 2.900°K de temperatura de color/ 75 w de potencia máxima en uso/ 10 lux como valor medio; puntos máximos menores de 20 lux / 306 w de potencia instalada</p> <p>Cueva: 41 lámparas de fluorescencia compacta de 9w y 2.900°K de temperatura de color/ 10 lámparas de fluorescencia compacta de 13w y 26 w para iluminación puntual de pinturas y grabados/ 517 w de potencia instalada.</p>
2002	Fallos en el sistema eléctrico. Aparición de organismos fotótrofos en el techo de la Sala de Policromos, en un foco junto a la cierva de la Sala III y en el foco junto al bisonte.
2002	Corte del suministro eléctrico en la Sala de Policromos. Iluminación con linternas.
2004	Corte del suministro eléctrico en el resto de la cueva. Iluminación con linternas.
2007	Desmantelamiento de toda la instalación eléctrica, canalizaciones, cableado y luminarias.
2013	Adquisición de iluminación portátil de tecnología Led.

2.3.1. Espectro continuo

La forma de espectro más sencilla, llamada espectro continuo, es la emitida por un cuerpo sólido o líquido que puede ser llevado hasta altas temperaturas. Estos espectros no presentan líneas porque contienen luz de todos los colores, que se suceden sin solución de continuidad como en un arco iris. Los espectros continuos sólo se pueden analizar con métodos espectrofotométricos. En el caso de un emisor ideal, llamado cuerpo negro, las intensidades de los colores del espectro sólo dependen de la temperatura. Dos de las leyes que rigen la distribución de energía en un espectro continuo fueron descubiertas alrededor de 1890 por el físico alemán Wilhelm Wien y los físicos austriacos Ludwig Boltzmann y Josef Stefan. La ley de Stefan-Boltzmann afirma que la energía total por unidad de tiempo radiada por un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta; la ley de desplazamiento de Wien afirma que, a medida que aumenta la temperatura, el espectro de radiación de un cuerpo negro se desplaza hacia las frecuencias altas de forma directamente proporcional a la temperatura absoluta. En 1900, el físico alemán Max Planck descubrió la tercera y más importante de las leyes que describen la distribución de energía entre las diferentes longitudes de onda radiadas por un cuerpo negro. Para deducir una ley que explicara sus resultados experimentales, Planck argumentó que las propiedades termodinámicas de la radiación térmica emitida por la materia debían ser las mismas independientemente del mecanismo de emisión y de las suposiciones sobre la naturaleza de los átomos. Estas ideas llevaron al desarrollo de la teoría cuántica.

2.3.2. Líneas espectrales

Cada elemento químico tiene un espectro característico, es decir, una distribución determinada de la radiación electromagnética. Ese espectro particular permite identificar la composición de una sustancia desconocida; esta técnica se llama espectroscopia. Los espectros de emisión, como los ejemplos que se muestran, están formados por varias líneas de longitud de onda determinada separadas por zonas oscuras. Las líneas indican la estructura molecular, y corresponden a transiciones de los átomos entre estados de energía definidos.

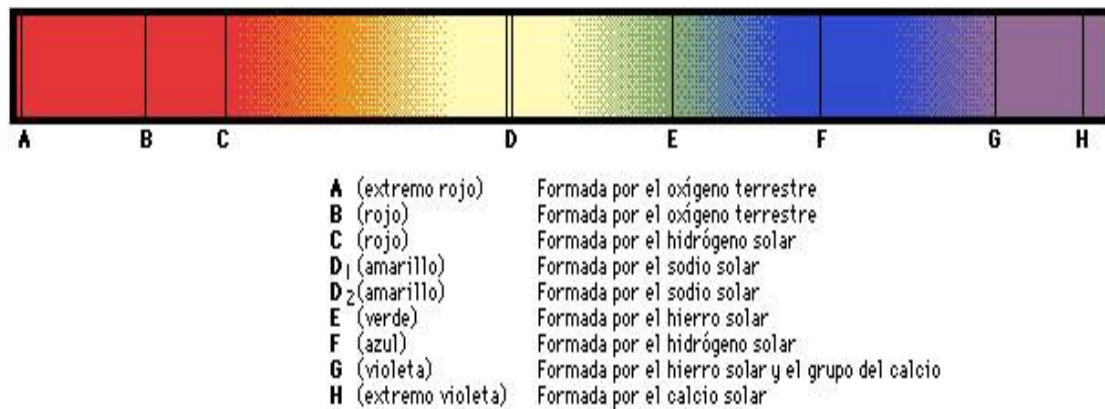


Figura 31: Espectros de emisión de diferentes elementos

La radiación solar puede fotografiarse y analizarse con un espectrógrafo. Las líneas oscuras del espectro se denominan líneas de absorción, y se deben a la absorción de la radiación por elementos de la atmósfera solar. Estudiando dichas líneas se pueden identificar los elementos que existen en el Sol. La línea intensa en un extremo del rojo del espectro es una de las líneas del hidrógeno, y las líneas del amarillo indican la presencia de sodio.

2.3.3. Color

La luz visible está formada por vibraciones electromagnéticas cuyas longitudes de onda van de unos 350 a unos 750 nanómetros. La luz blanca es la suma de todas estas vibraciones cuando sus intensidades son aproximadamente iguales. En toda radiación luminosa se pueden distinguir dos aspectos: uno cuantitativo, su intensidad, y otro cualitativo, su cromaticidad. Esta última viene determinada por dos sensaciones que aprecia el ojo: la tonalidad y la saturación.

Todos los objetos tienen la propiedad de absorber y reflejar ciertas radiaciones electromagnéticas. La mayoría de los colores que experimentamos normalmente son mezclas de longitudes de onda que provienen de la absorción parcial de la luz blanca. Casi todos los objetos deben su color a los filtros, pigmentos o pinturas, que absorben determinadas longitudes de onda de la luz blanca y reflejan o transmiten las demás; estas longitudes de onda reflejadas o transmitidas son las que producen la sensación de color, que se conoce como color pigmento.

2.3.4. Absorción

No se conoce bien el mecanismo por el que las sustancias absorben la luz. Aparentemente, el proceso depende de la estructura molecular de la sustancia. En el caso de los compuestos orgánicos, sólo muestran color los compuestos no saturados., y su tonalidad puede cambiarse alterándolos químicamente. Los compuestos inorgánicos suelen ser incoloros en solución o en forma líquida, salvo los compuestos de los llamados elementos de transición.

2.3.5. Propiedades cualitativas y cuantitativas de la luz

Dispersión, fenómeno de separación de las ondas de distinta frecuencia al atravesar un material. Todos los medios materiales son más o menos dispersivos.

Reflexión y refracción, Si un rayo de luz que se propaga a través de un medio homogéneo incide sobre la superficie de un segundo medio homogéneo, parte de la luz es reflejada y parte entra como rayo refractado en el segundo medio, donde puede o no ser absorbido. La cantidad de luz reflejada depende de la relación entre los índices de refracción de ambos medios. El plano de incidencia se define como el plano formado por el rayo incidente y la normal (es decir, la línea perpendicular a la superficie del medio) en el punto de incidencia. El ángulo de incidencia es el ángulo entre el rayo incidente y la normal. Los ángulos de reflexión y refracción se definen de modo análogo.

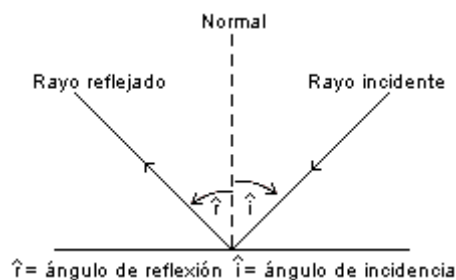


Figura 32: Los ángulos de reflexión

Las leyes de la reflexión afirman que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, y que el rayo incidente, el rayo reflejado y la normal en el punto de

incidencia se encuentran en un mismo plano. Si la superficie del segundo medio es lisa, puede actuar como un espejo y producir una imagen reflejada

Si la superficie del segundo medio es rugosa, las normales a los distintos puntos de la superficie se encuentran en direcciones aleatorias. En ese caso, los rayos que se encuentren en el mismo plano al salir de una fuente puntual de luz tendrán un plano de incidencia, y por tanto de reflexión, aleatorio. Esto hace que se dispersen y no puedan formar una imagen.

Angulo crítico

Puesto que los rayos se alejan de la normal cuando entran en un medio menos denso, y la desviación de la normal aumenta a medida que aumenta el ángulo de incidencia, hay un determinado ángulo de incidencia, denominado ángulo crítico, para el que el rayo refractado forma un ángulo de 90° con la normal, por lo que avanza justo a lo largo de la superficie de separación entre ambos medios. Si el ángulo de incidencia se hace mayor que el ángulo crítico, los rayos de luz serán totalmente reflejados. La reflexión total no puede producirse cuando la luz pasa de un medio menos denso a otro más denso. Las tres ilustraciones de la figura 6 muestran la refracción ordinaria, la refracción en el ángulo crítico y la reflexión total.

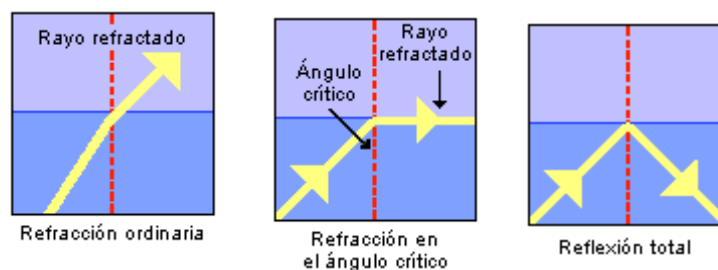


Figura 33: Refracción y reflexión

Difracción, en física, fenómeno del movimiento ondulatorio en el que una onda de cualquier tipo se extiende después de pasar junto al borde de un objeto sólido o atravesar una rendija estrecha, en lugar de seguir avanzando en línea recta. La expansión de la luz por la difracción produce una borrosidad que limita la capacidad de aumento útil. Cuando la luz pasa a través de una rendija cuyo tamaño es próximo a la longitud de onda de la luz, ésta se difracta, se produce un cambio en la forma de la onda.

Polarización

Si los vectores eléctricos de todas las ondas tienen el mismo ángulo acimutal (lo que significa que todas las ondas transversales están en el mismo plano), se dice que la luz está polarizada en un plano, o polarizada linealmente.

Cualquier onda electromagnética puede considerarse como la suma de dos conjuntos de ondas: uno en el que el vector eléctrico vibra formando ángulo recto con el plano de incidencia y otro en el que vibra de forma paralela a dicho plano. Entre las vibraciones de ambas componentes puede existir una diferencia de fase, que puede permanecer constante o variar de forma constante. Cuando la luz está linealmente polarizada, por ejemplo, esta diferencia de fase se hace 0 o 180°. Si la relación de fase es aleatoria, pero una de las componentes es más intensa que la otra, la luz está en parte polarizada. Cuando la luz es dispersada por partículas de polvo, por ejemplo, la luz que se dispersa en un ángulo de 90°. Con la trayectoria original del haz está polarizada en un plano, lo que explica por qué la luz procedente del cenit está marcadamente polarizada.

La luz polarizada está formada por fotones individuales cuyos vectores de campo eléctrico están todos alineados en la misma dirección. La luz normal es no polarizada, porque los fotones se emiten de forma aleatoria, mientras que la luz láser es polarizada porque los fotones se emiten coherentemente. Cuando la luz atraviesa un filtro polarizador, el campo eléctrico interactúa más intensamente con las moléculas orientadas en una determinada dirección. Esto hace que el haz incidente se divida en dos haces con vectores eléctricos perpendiculares entre sí. Un filtro horizontal absorbe los fotones con vector eléctrico vertical (como se muestra en la ilustración). Un segundo filtro girado 90° respecto al primero absorbe el resto de los fotones; si el ángulo es diferente sólo se absorbe una parte de la luz.

Rendimiento Luminoso

Se llama eficacia luminosa o rendimiento luminoso, cuyo símbolo es la letra griega η , a la relación entre el flujo total en lúmenes producido por un foco (Lampara) y la potencia que se consume en Vatios cuyo valor viene dado en Lúmenes por Vatio.

Índice de Rendimiento del Color

Uno de los puntos más importantes en la iluminación de cuevas es la armonía y la combinación de los colores, sin embargo, esto puede ser perjudicial si no se escogen las lámparas adecuadas.

La reproducción de colores de una lámpara es medida por una escala llamada IRC (Índice de Reproducción de Colores). Cuanto más próximo este índice al IRC 100 (dado a la luz solar), más fielmente los colores serán vistos en la decoración. Esto ocurre porque, en realidad, lo que observamos es el reflejo de la luz que ilumina los objetos, ya que en la oscuridad no vemos los colores. La luz es compuesta por los siete colores del arco iris y los pigmentos contenidos en los objetos tienen la capacidad de absorber determinados colores y reflejar otros. Por lo tanto, la cualidad de reproducción de los colores de la lámpara utilizada va a influir directamente en los colores de la decoración, alterando o manteniendo los colores escogidos.

Un ejemplo claro de esto es cuando compramos ropa en un almacén y después cuando la vestimos durante el día, percibimos que el color no era exactamente aquel que nos parecía haber visto. La capacidad de las lámparas para reproducir bien los colores (IRC) es independiente de su temperatura de color ($^{\circ}\text{K}$). Existen tipos de lámparas con tres temperaturas de color diferentes y el mismo IRC.

En una residencia debemos utilizar lámparas con buena reproducción de colores (IRC arriba de 75), pues el color es fundamental para el confort y belleza del ambiente.

2.3.6. Lámparas

- Incandescente: en estas lámparas, la luz se genera como consecuencia del paso de la corriente eléctrica a través de un filamento conductor, en cual se calienta hasta ponerse incandescente. Se componen de un filamento de tungsteno, de un gas de relleno, que puede ser nitrógeno, argón, o criptón, de una ampolla, y de un casquillo que sirve para roscar la lámpara al porta lámparas.

Dentro del sistema de lámpara de incandescencia, destacan:

1. Lámpara de halógeno que se caracteriza por la adición de un halógeno al gas de relleno de una bombilla. Estas son sensiblemente más pequeñas que las lámparas de incandescencia corrientes.
 2. Lámparas reflectoras: presentan una superficie reflectora en la pared interior de la ampolla. La parte frontal de estas lámparas es opaca, y la amplitud del haz luminoso está determinada por la posición del filamento con respecto al reflector.
 3. Lámparas para proyectores que se usan en teatro y en estudios, y las empleadas para la fotografía.
- Lámparas de descarga: se iluminan al aplicar una tensión elevada a dos electrodos que se hallan en el interior del tubo de descarga y se crea así un campo eléctrico, su forma es tubular o elíptica en ellas se distinguen:
 1. Lámparas de sodio a baja presión, que no producen bien los colores pero que son de larga duración y de un gran rendimiento luminoso, se usan en los alumbrados de las calles.
 2. Lámparas de sodio de alta presión, estas producen bien los colores y su rendimiento luminoso es bueno, también es utilizado en el alumbrado público.
 3. Lámparas de mercurio, se destinan al alumbrado exterior y el industrial, son de larga duración y producen bien los colores.
 4. Lámparas de luz mezcla, presentan un rendimiento doble y su duración es casi seis veces más elevada que las lámparas de incandescencia.
 - Lámparas Fluorescentes, generalmente de forma tubular se caracteriza por tener un electrodo en cada extremo y por tener vapor de mercurio a baja presión y una pequeña cantidad de gas inerte que sirve para el encendido. Actualmente las lámparas fluorescentes aportan una excelente reproducción de colores junto a un elevado rendimiento luminoso, gracias a los recientes descubrimientos técnicos. Por término medio se puede calcular una vida de alrededor de 1.000 horas para la incandescente y de unas 6.000 para la fluorescente.

Por combustión

Los fuegos, brasas, etc., son interesantes fuentes de luz, aunque la mayoría de las veces hay que añadir luz artificial justificada por la fuente de calor. La gama de temperaturas de color posibles es enorme, mucho más de lo que parece, yendo desde, por ejemplo, la corteza de pino (muy baja) a la madera de sarmiento (parra), que produce algo menos de luz, pero de una temperatura de color más alta; incluso los fuegos producidos por gas pueden llegar a tonalidades verdes, dependiendo del combustible. Es curioso que a veces utilicemos fuego para determinados ambientes, mientras los técnicos de efectos especiales utilicen canalizaciones de gas y butano o propano para producir efectos de incendios y explosiones. En cualquier caso, un accesorio necesario para conseguir el tipo de luz deseada en un fuego es una pequeña bombona de oxígeno (con las precauciones necesarias) que no sólo acelerará o disminuirá la combustión, sino que variará la temperatura de color. Aparte de esto, hay determinadas sustancias especializadas para cambiar el color de un fuego.

Por incandescencia

Son las más comunes en iluminación de vídeo y, en gran parte, en cine. Producen luz por la radiación desprendida de filamentos a través de los cuales se hace pasar una corriente eléctrica, que los calienta hasta que emiten luz. Las cosas que más diferencian unas de otras son el filamento, la ampolla, el gas de relleno y el casco.

Estándar

Se trata de ampollas de vidrio soplado que protegen del medio ambiente un filamento de wolframio o tungsteno; es necesaria la protección para que el filamento no entre en contacto con la atmósfera, cuyo oxígeno produciría la fusión del mismo. A medida que el filamento se calienta, el filamento se va vaporizando, es decir, va perdiendo partículas de wolframio, el filamento va adelgazando y termina por romperse. Para paliar este fenómeno, la ampolla se llena de un gas inerte, normalmente una mezcla de argón y nitrógeno, y en muchos casos el filamento se enrolla en forma de hélice.

a) Normal: Hay muchas variaciones sobre la conocida bombilla estándar, dependiendo del tipo de filamento (recto, en espiral, axial...) y del acabado de la ampolla: Clara, transparente; mate

interior, esmerilada por dentro, que produce una luz más difusa; blanca, pintada por fuera, con una mayor difusión de luz, y coloreada, ya sea por dentro o por fuera.

La última característica que diferencia unas lámparas de otras es el casquillo, que puede ser el conocido de rosca Edison, el de bayoneta o Swan, con dos contactos, que se coloca empujando sobre un muelle y bloqueándolo, y el de espigos, con dos terminales que se "clavan" en la hembra.

Tienen poca eficacia luminosa, entre 6 y 20 lm/W, por lo que tienen un alto coste de funcionamiento, y pierden excesiva energía en forma de calor. Pero son baratas y pequeñas. Su duración media es de unas 1.000 horas.

Las hay de tensiones nominales de 125 y 220 V, y también para 12, 24 y 60 V. A veces las podemos utilizar sobrevoltadas, con lo que reduciremos notablemente su vida media.

Las hay de 15, 25, 40, 60, 100, 150, 200, 300, 500, 1.000 y 1.500 W, aunque a partir de los 300 o 500 W su precio, en relación con su eficacia, empieza a hacer recomendable la utilización de otro tipo de lámpara.

Si bien estas lámparas son de uso habitualmente doméstico, pueden solucionar serios problemas en la construcción de iluminaciones de interior, teniendo siempre en cuenta su baja temperatura de color con respecto a otras luminarias profesionales y su pérdida de la misma con su envejecimiento o con la falta de tensión.

Un tipo especial de estas lámparas es la reflectora que, si bien es similar en todo a la estándar, incorpora un reflector en la ampolla, que tiene una forma distinta, pudiéndose conseguir cierta directividad en la luz. Las hay de dos tipos:

b) Con reflector pintado: Son de vidrio soplado. Su forma es parabólica o elíptica, y el material reflector interior es aluminio o plata. Producen un ángulo de concentración que, por fabricación, depende de la potencia: Las de 25, 40 y 60 W dan un ángulo de 35 grados, mientras que algunas de 40 y 60 y las de 100, 150 y 200 W producen un ángulo de 80 grados, con una iluminación bastante uniforme.

c) *Lámparas PAR (Parabolic Alumined Reflector)*: Son de vidrio prensado, un vidrio duro especial, y su ampolla tiene dos piezas: una de forma parabólica y otra una lente que regula la abertura del haz. Las lámparas PAR, sí son muy utilizadas en iluminación de espectáculos, así como en iluminación profesional de cine y vídeo, en muchos casos formando baterías; en uso común se utilizan sobre todo en salas de exposiciones. Las hay de 75, 100 y 150 W, con ángulos de 15 grados y 40 grados; y en iluminación profesional las hay también de mayores potencias, con ángulos que dependen del fabricante.

Halógenos

Son lámparas más pequeñas que las estándar, de mayor eficacia luminosa y mayor vida media. Su fundamento está en incorporar al gas de relleno una pequeña cantidad de yodo para evitar, o retrasar, la vaporización.

Vulgarmente los conocemos como cuarzos, y son de los focos más utilizados en iluminación profesional. La ampolla es cilíndrica, de cuarzo, su filamento es una espiral de wolframio y el gas de relleno está compuesto por argón, nitrógeno (como las estándar) y un halógeno, habitualmente yodo. Los contactos están uno a cada lado de la ampolla, y están protegidos por una envoltura cerámica. Dos precauciones fundamentales deben tomarse al utilizarlos: por un lado, procurar la horizontalidad de las lámparas y, por otro, no tocar la ampolla con los dedos, pues la grasa o el sudor pueden desvitrificar el cuarzo, perdiendo éste transparencia, e incluso llegando a producir su rotura cuando se calienta.

Para su consumo doméstico, hay también en el mercado lámparas de este tipo con una segunda envoltura de vidrio, que facilita su manipulación y hace más fácil la colocación horizontal del cuarzo, además de proporcionar un contacto con casquillo estándar.

La eficacia luminosa es de 22 lm/W, siendo por tanto su flujo luminoso superior al de las lámparas estándar (Por ejemplo, una de 1.000 W produciría 22.000 lm; mientras que una de incandescencia estándar solamente 18.800).

Hay toda una gama de potencias en iluminación profesional, dependiendo del tipo de foco en que van colocadas, desde los 200 W de las antorchas a los 10.000 o 12.000 de un

Fresnel grande. Las más habituales son, de todos modos, las de 800 y 1.000 W en los conocidos "butanitos" y de 2.000, 4.000, 5.000 y 6.000 W en focos spot, fresnel o soft de tipo plató.

Su vida media es, aproximadamente, de 2.000 horas, aunque depende en gran medida de los fabricantes.

Su temperatura de color es, originariamente, de 3.200 o 3.400 K, aunque hay que tener en cuenta que pierden bastante cuando se utilizan a bajas intensidades, y cuando se van gastando, por lo que hay que tener cuidado cuando se utilizan con dimmers y reguladores y cuando están viejas.

Otras lámparas de incandescencia

Hay algunas lámparas específicas para determinadas utilizaciones que también son de incandescencia, como por ejemplo, las de fotografía y proyectores de diapositivas o cine; las lámparas miniatura para linternas, juguetes, etc.; las de los coches (aunque cada vez se imponen más las halógenas para esta utilización) y las tubulares, que, aunque van metidas en ampollas cilíndricas, no deben ser confundidas con los tubos fluorescentes. Todas ellas son para empleos específicos, y en la mayoría de los casos encontraremos en nuestro trabajo otras de mayor eficacia y más fáciles de manipular para obtener similares resultados.

Por descarga

Los primeros ejemplos de este tipo de luz los tenemos en los arcos de carbón utilizados en los antiguos proyectores de cine o de teatro, en los que se aplica una corriente a dos carbones de grafito enfrentados, y se les mantiene a una distancia constante, la justa para que salte el arco voltaico entre ellos. Los antiguos proyccionistas tenían, por lo tanto, que estar continuamente acercando los carbones, puesto que estos se iban gastando. El arco sólo salta a una distancia justa; a mayor distancia el campo eléctrico no tiene efectividad, y a menor los carbones se convierten en simples conductores. La luz se produce por un fenómeno de luminiscencia, es decir, por la radiación luminosa producida por la descarga eléctrica en un medio gaseoso (los electrones de un átomo excitados por una descarga eléctrica suben de nivel y adquieren una energía que, al volver a su nivel en el átomo, sueltan en forma de radiación electromagnética).

Si colocamos en un tubo un ánodo (+) en un extremo y un cátodo (-) en el otro, los electrones son atraídos por el ánodo, y en su camino chocan con los átomos del gas produciendo luminiscencia; algunos átomos se ionizan por el choque (pierden electrones), con lo que el número de electrones aumenta y el fenómeno continúa, aunque atenuemos la corriente original. Los primeros electrones provienen de los electrodos, recubiertos de cesio o bario (altamente emisivos al calentarlos, efecto termoiónico). Luego hay que hacer un circuito exterior para limitar la intensidad de la corriente y controlar el proceso de multiplicación de electrones en el interior del tubo.

Fluorescentes

El tubo de descarga suele ser de cuarzo, recubierto en su interior por polvos fluorescentes, sobre los cuales inciden radiaciones ultravioletas producidas por la descarga eléctrica en el gas del interior, produciendo la fluorescencia (transformación de radiación no visibles en visibles).

El diámetro del tubo suele ser de 16, 26 o 38 mm y las longitudes de 600, 1.200 y 1.500 mm (20, 40 y 65 W).

Los electrodos son de hilo de wolframio enrollado, y recubiertos de material emisor, y trabajan a altas temperaturas.

El gas de relleno suele ser argón o neón, fácilmente ionizables e inertes.

Los polvos fluorescentes son especialmente interesantes para nosotros, ya que del tipo de polvo depender el color dominante de la luz emitida, a pesar del aspecto aparentemente blanco de la misma: El más común es el silicato de cinc, cuya dominante es amarillo-verdosa; el borato de cadmio da rosa clara; el silicato de cadmio, amarillo-rosa; el silicato de cinc y berilio, amarilla, y el tungstato de magnesio, azul.

Los tubos pueden encenderse de diferentes modos:

a) Precalentamiento con cebador: hace falta una reactancia o balastro y un cebador. La reactancia da una tensión inicial superior a la que recibe para iniciar el proceso en el tubo, y limita la intensidad que circula a su través. El cebador, compuesto de dos láminas, una de ellas

bimetálica, dentro de una ampolla, es el encargado de cerrar el circuito de caldeo: al conectar, entre sus dos láminas se produce un arco que calienta la ampolla; la lámina bimetálica se curva y cierra el circuito, con lo que se calientan los filamentos hasta su incandescencia. Luego la temperatura disminuye y la lámina vuelve a su posición, con lo que el circuito se abre de golpe, produciendo una sobretensión en la reactancia, y encendiéndose la lámpara.

b) Pre calentamiento sin cebador: La lámpara se enciende mediante un circuito auxiliar, que calienta la lámpara mientras está en funcionamiento, y un transformador que al ser conectado calienta los electrodos rápidamente hasta que alcanzan la temperatura de emisión y la lámpara enciende espontáneamente. Sigue siendo necesaria una reactancia estabilizadora.

c) Encendido instantáneo: Son las llamadas "de cátodo frío", ya que no necesitan calentar el mismo; consisten en proporcionar una diferencia de potencial suficiente entre los electrodos, mediante un autotransformador, para que la lámpara encienda instantáneamente. Habitualmente las podemos distinguir por llevar sólo un espigo de contacto en cada casco, mientras que los demás fluorescentes llevan dos. Son los utilizados, entre otras cosas, para rótulos luminosos; se construyen de tubo estrecho, con formas determinadas, para rótulos luminosos, con diámetros de 13, 17 y 22 mm. Producen diferentes colores según el gas que se introduzca: verde con helio, azulado-verdoso con mercurio...

d) Encendido electrónico: llevan una reactancia electrónica o circuito inversor, que convierte la corriente continua en alterna. Suelen ir alimentadas con pequeñas tensiones, de 12 o 24 V.

Existen algunos tipos de fluorescentes especiales: algunos de tamaño miniatura, otros de colores, en que el tubo está hecho de un cristal de determinado color, y éstas se utilizan en discotecas, teatros... pueden ser útiles para determinadas ambientaciones. Otras están construidas igual que las halógenas de doble envoltura, y un par de fluorescentes van metidos en una ampolla con un contacto más estándar.

Suelen conectarse con un condensador para disminuir el consume y aumentar el factor de potencia.

La eficacia luminosa, según potencia, oscila entre 40 y 100 lm/W: su vida media es alta, entre 6.000 y 9.000 horas y la temperatura de color depende de los polvos fluorescentes.

Importante: El flujo luminoso depende de la temperatura exterior. Entre 5 y 30 °C es constante; fuera de ese margen, pierde flujo notablemente.

Cuidado: Un sólo fluorescente puede producir efecto estroboscópico, es decir, dar la sensación de que algo que está en movimiento -que gira, sobre todo- está parado, al no iluminarlo constantemente, sino con una frecuencia. Al iluminar con fluorescentes se debe, por tanto, conectar más de uno, desfasados, para evitar este fenómeno, que podría producir que, ante una obturación -sea fotográfica, cinematográfica o un shutter de vídeo-, ésta coincida con la frecuencia del tubo, arriesgándonos, en el peor de los casos, a fotografiar la oscuridad y, en el mejor, extraños efectos estroboscópicos.

Vapor de mercurio

En el interior del tubo, además de los electrodos normales, hay otros dos auxiliares para el encendido, un gas inerte e ionizable (argón), y unas gotas de mercurio, que es el que produce las radiaciones al ser excitado. El tubo va metido en una ampolla de vidrio que, además de protegerlo, sirve para absorber las radiaciones ultravioletas que se producen. Esta ampolla va montada en un casquillo estándar. Necesitan reactancia. Al conectar, se produce un arco entre los electrodos auxiliares, que calienta el mercurio, que se va evaporando lentamente, por lo que la lámpara se enciende también lentamente

La eficacia oscila entre 30 y 95 lm/W y su vida media entre 6.000 y 9.000 horas.

Ya que tarda en encender unos cinco minutos, si se apaga hay que esperar al menos otros cinco minutos, para dar tiempo a que el mercurio se condense.

Las hay de varios tipos:

- a) Ampolla transparente: Iluminan muy bien los tonos verdes y azules, pero tienen problemas para la reproducción de los demás.
- b) De color corregido: Tienen una ampolla recubierta de material fluorescente, que amplía el espectro de iluminación de la lámpara. Son las que nos encontraremos habitualmente en exteriores de ciudad (normalmente en grandes globos)

- c) De luz mixta: Son como las de color corregido, pero añaden un filamento de incandescencia (radiación blanco-amarilla), que además limita el paso de corriente, por lo que no necesitan accesorios para el encendido.
- d) H.M.I.: (con halógenos metálicos) Añaden ioduros metálicos (sodio, indio, talio) en el interior. Tienen forma elipsoidal (normalmente con una capa difusora) o tubular (normalmente clara, sin difusor), y tienen una gran eficacia luminosa, hasta 95 lm/W. Pero lo más importante es su reproducción cromática, casi la misma que la de la luz solar. Son las llamadas H.M.I., o de luz-día, muy conocidas en el mundo de la iluminación cinematográfica y cada vez más utilizadas; se suelen fabricar ya perfectamente calibradas para una temperatura de color de 5.600 K. ¡Y, ojo! Pueden presentar un problema de obturación por su frecuencia.

Una lámpara de 1.000 W puede producir un flujo de 80.000 lm; y una tubular clara de 3.500 hasta 300.000 lm.

Vapor de sodio

Producen luz por la excitación del sodio que hay en el interior del tubo de descarga. Normalmente el gas de relleno es Neón. Las hay de baja y de alta presión.

- a) De baja presión: El tubo suele ser de cuarzo, en forma de U, con un electrodo a cada lado. El sodio, con la lámpara fría, toma forma de gotas. El tubo de descarga va dentro de una ampolla tubular que lo protege, y normalmente lleva un casquillo de bayoneta. Al producirse la descarga, un arco, a través del neón se produce luz, y conforme se va evaporando el sodio, la concentración de éste en el gas aumenta, y la luz va siendo progresivamente más y más amarilla. Según el voltaje necesario para el encendido, pueden necesitar un autotransformador en lugar de una reactancia.

Son las de mayor eficacia luminosa (mayor a 180 lm/W), y su vida media es de unas 6.000 horas y emiten luz monocromática, naranja-amarilla, de baja temperatura de color.

- b) De alta presión: El tubo suele ser de material cerámico translúcido, y tiene dentro una amalgama de sodio (mercurio y sodio). Las ampollas suelen ser ovoidales o tubulares,

y el casquillo, normalmente, de rosca. Funciona igual que la de baja presión, aunque necesita un mecanismo, el ignitor (un cebador), que produce una tensión entre 3 y 5 KV para el encendido, aunque suelen llevarlo incorporado en la propia lámpara. Al aumentar la presión en la lámpara se va aumentando el reparto espectral de la luz emitida, hasta llegar a un espectro casi continuo, pero su dominante sigue siendo amarilla, aunque no tanto como en las de baja presión.

Su eficacia luminosa va de los 80 a los 130 lm/W, y su vida media es superior a las 9.000 horas. Las encontraremos en los mismos lugares que las de baja presión, pero las distinguiremos por su mejor reproducción de los colores.

Especiales

a) Ultravioletas: Son de vapor de mercurio; las hay de:

- Luz negra: apenas emiten radiaciones visibles; se pueden pintar determinados objetos con una pintura especial que los hace visibles ante esta luz (Teatro Negro de Praga). Sin embargo, algunas emulsiones y algunos targets de vídeo sí pueden ser más o menos sensibles a ella. Las podemos encontrar en bancos y discotecas.
- Lámparas solares: emiten el espectro visible, y además una fuerte radiación infrarroja y ultravioleta para bronceado y envejecimiento de plásticos
- Lámparas de ozono: emiten radiaciones ultravioletas utilizadas en esterilización de material quirúrgico

b) Infrarrojas: Su filamento de wolframio en espiral emite fundamentalmente radiaciones infrarrojas. Se utilizan para dar calor.

c) De Neón: Son como las de incandescencia, pero incluyen dos electrodos y gas neón. Su pequeño rendimiento y bajo consumo hacen que prácticamente no se utilicen, salvo para señalización. Tienen una gran duración.

d) De Xenón de alta presión

Conclusión

A modo de resumen, se presenta la siguiente tabla. Posteriormente se mostrará el análisis espectral de la solución empleada.

Tabla 4: Resumen con las diferentes fuentes de iluminación

	Eficacia lm/W	Potencia/W	Color Rendering Index	Vida media Horas
Incandescente	20	15-1000	100	1000
Halógeno	30	5-2000	100	2000-5000
Fluorescente	55-120	5-125	55-99	10.000- 25.000
Mercurio Inductivo	70-80	55-165	80	60.000- 100.000
Baja presión de Sodio	200	35-180	0	20
Xenon Dielectric Barrier Discharge (DBD)	30	20-150	85	100
Alta Presión Xenón	30	1.000-15.000	90	2000
Alta presión Sodio	50-150	35-1000	25-85	10.000- 30.000
Alta presión Mercurio	60	50-1000	15-55	10.000- 30.000
Mercurio de muy alta presión	60	100-200	60	10
Metal Halide	70-100	35-2000	70-90	10.000- 20.000
Sulfuro	95	1500	80	60.000
LEDs	100	0.1-10	0-95	50.000-

Tabla 5: Conversión energía potencia para diferentes fuentes de luz

	Incandescente	Fluorescente	Metal Halido	LEDs
Luz Visible	10%	20%	30%	15-25%
IR	70%	40%	15%	~0%
UV	0%	0%	20%	0%
Energía emitida	80%	60%	65%	15-25%
Calor	20%	40%	35%	75-85%
Total	100%	100%	100%	100%

Capítulo 3: Análisis de laboratorio para el control de la interacción luz-medio

3.1. Metodología propuesta

Se ha realizado un minucioso estudio sobre las variables que pueden afectar a la captura de información radiométrica en un entorno arqueológico, tales como:

- Material empleado en la fuente de iluminación: se han considerado diferentes fuentes de iluminación de diferente origen como LED, vapor de gas, tungsteno y las halógenas.
- Potencia, ángulo de incidencia y distancia de la fuente de iluminación: Con el objetivo de no dañar el arte rupestre, se siguieron las recomendaciones de ICOM (*International Council of Museums*). Miguel Ángel R. Lorite, dentro del Proyecto de Conservación de la cueva de Altamira. Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales (ICRBC, actual IPCE) recomienda en la renovación de todo el sistema de iluminación y eléctrico existente en 1992 en la cueva (fluorescencia e incandescencia y tendido eléctrico obsoleto). Recomienda 10 lux, debajo de 400 nm para evitar eflorescencia de especies vegetales.

Se han considerado tres familias de lámparas, las de tungsteno, las halógenas y las infrarrojas.

A. Lámparas de Tungsteno: Consiste en una ampolla o bulbo de vidrio que contiene cierta cantidad de un gas noble como el nitrógeno -o criptón en las más pequeñas-, estando totalmente exentas de oxígeno en su interior. El filamento metálico del interior -por el cual circula corriente eléctrica- actúa como una resistencia y, al calentarse, emite luz de espectro continuo.

Existe una gran variedad de lámparas de tungsteno en una amplia gama de potencias, si bien de ellas sólo unas pocas cumplen las recomendaciones de ICOM. Se han considerado:

- Fotolamparas Tipo B. Funcionan en forma sobrevoltada y la vida útil es de 50 a 100 horas, con una temperatura color es de 3.200° K. Según el gas que utilizan se las conoce como **Nitraphot** (nitrógeno) o Argaphot (argón). Se fabrican en potencias de

250, 500 y 1.000 Watts. Se caracterizan por tener una baja radiación azul y ultravioleta.

- Fotolamparas Tipo S. Están más sobrecalentadas que las anteriores y, por lo tanto, tienen una temperatura color de 3.400° K, reduciéndose la vida útil entre 2 y 15 horas. Se ha empleado el modelo **Photolita**
- De ampliadora. En potencias de 75 y 150 Watts, son del tipo B (3.200°K), con ampolla de vidrio opalino y vida útil de 50 a 100 horas. Se debe tener especial cuidado en elegir la potencia adecuada, en función de la capacidad de difusión de calor de la zona. Se ha empleado una bombilla Photocrescenta de 75W.

B. Lámparas halógenas: Con las lámparas halógenas se logra un muy superior rendimiento y se mantiene constante la composición espectral. Se distinguen por tener un elemento halógeno como el yodo, que forma parte de un ciclo muy interesante: al evaporarse el tungsteno del filamento, en lugar de depositarse en las paredes del bulbo, se combina con el halógeno, formando halogenuro de tungsteno que, a su vez, por el calor del filamento, se deposita en este. Por esa razón, el filamento conserva siempre su mismo grosor e irradia una temperatura color constante que varía entre los 3.000° y 3.400°K. Existen diferentes tipos para diversas aplicaciones: con forma de tubo, en "U" y de bulbo (**Halolux y Cromalita**).

C. Lámparas infrarrojas: Son un tipo de lámpara incandescente reforzada con propiedad de radiación infrarroja. Emite menos rayos visibles que una lámpara normal, pero la lámpara infrarroja está diseñada para transformar energía de entrada en rayos infrarrojos con energía térmica y tener una mayor vida. Normalmente utilizan filamentos de tungsteno, por ser más eficientes que las de microbio. Se han empleado dos lámparas infrarrojas de diferente voltaje.

La reflectografía infrarroja se caracteriza por ser un método no intrusivo. Esto significa que no ha de ser nociva ni entra en contacto con el elemento a medir.

Se realizaron una serie de prácticas en campo, para poder determinar la eficiencia de diferentes parámetros de observación.

Las variables analizadas han sido:

- Intensidad de flujo radiante:

- Ángulo de incidencia al objeto
- Distancia del foco al elemento de interés.

3.2. Resultados relativos a fuentes de iluminación

A la hora de analizar el arte rupestre, a veces resulta interesante colocar el foco de luz en diferentes ángulos de incidencia, pues permite profundizar mejor en el soporte, sobre todo si es una veladura calcítica y una superposición de pigmentos.

Se han realizado una serie de pruebas en laboratorio y campo analizando las fuentes de iluminación indicadas anteriormente y variando el ángulo de inclinación:

- Normal a la superficie (0°)
- 15° respecto a la normal
- 30° respecto a la normal
- 37. 5° respecto a la normal
- 45° respecto a la normal

No se consideraron ángulos de incidencia mayores a 45° debido a la gran reflexión especular existente en el medio.

A partir de las pruebas de laboratorio, se fijó la distancia mínima a la que debía situarse cada tipo de foco para no ser nocivo ni alterar las condiciones de equilibrio del arte rupestre.

3.2.1. Lámparas incandescentes

Consiste en una ampolla o bulbo de vidrio que contiene cierta cantidad de un gas noble como el nitrógeno -o criptón en las más pequeñas-, estando totalmente exentas de oxígeno en su interior. El filamento metálico del interior -por el cual circula corriente eléctrica- actúa como una resistencia y, al calentarse, emite luz de espectro continuo.

A continuación, se muestran una serie de lámparas incandescentes de 50W con reflector blanco, 75W omnidireccional y 40W de interiores.



Figura 34: Lámparas incandescentes empleadas en las pruebas de laboratorio

5.2.1.1. Fitolamparas Tipo B.

Funcionan en forma sobrevoltada y la vida útil es de 50 a 100 horas, con una temperatura color es de 3.200° K. Según el gas que utilizan se las conoce como **Nitraphot** (nitrógeno) o Argaphot (argón). Se fabrican en potencias de 250, 500 y 1.000 Watts. Se caracterizan por tener una baja radiación azul y ultravioleta.

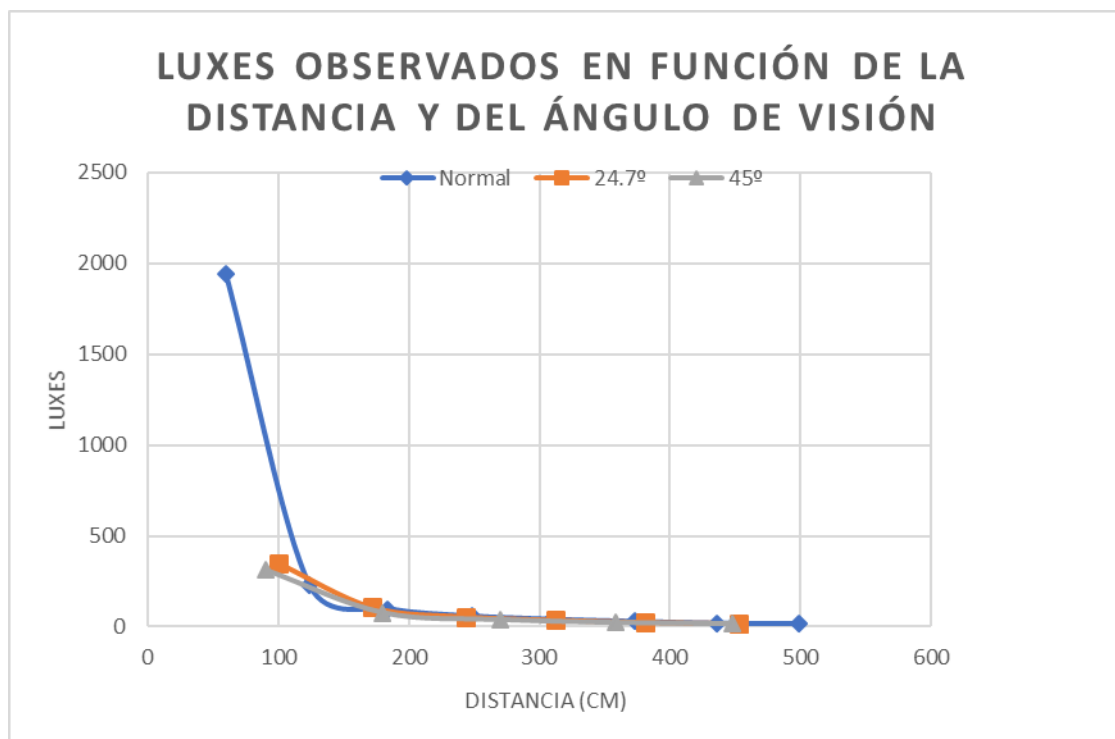


Figura 35: Luxes observados utilizando como fuente de iluminación NitraphotB de 500W a diferentes distancias.

3.2.1.2. Fitolamparas Tipo S.

Están más sobrevoltadas que las anteriores y, por lo tanto, tienen una temperatura color de 3.400° K, reduciéndose la vida útil entre 2 y 15 horas. Se ha empleado el modelo

Photolita

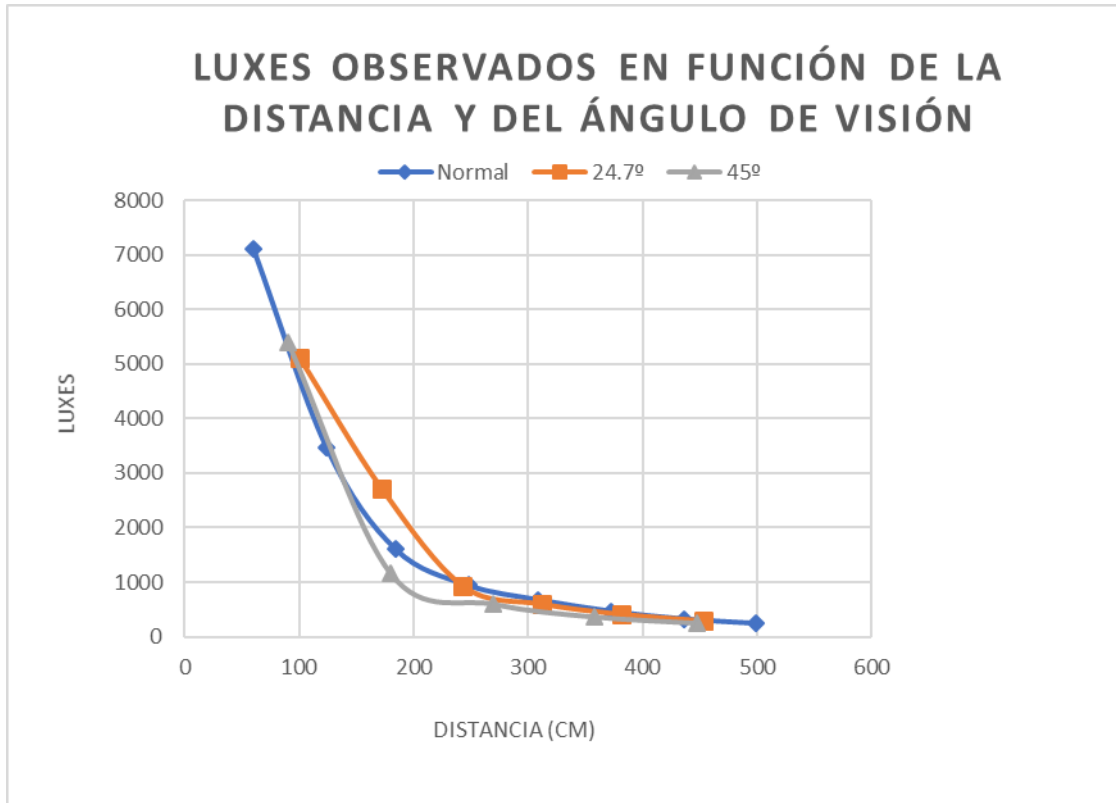


Figura 36: Luxes observados utilizando como fuente de iluminación Photolita de 500W a diferentes distancias

3.2.1.3. De ampliadora.

En potencias de 75 y 150 Watts, son del tipo B (3.200°K), con ampolla de vidrio opalino y vida útil de 50 a 100 horas. Se debe tener especial cuidado en elegir la potencia adecuada, en función de la capacidad de difusión de calor de la zona. Se ha empleado una bombilla Photocrescenta de 75W

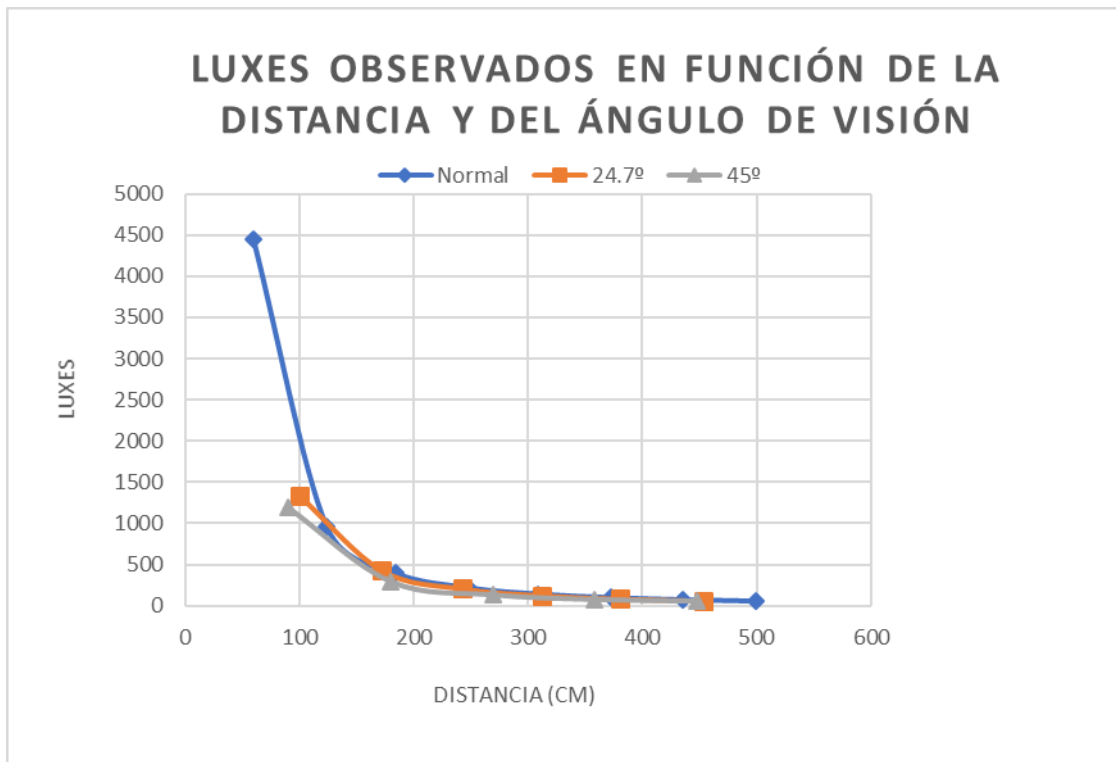


Figura 37: Luxes observados utilizando como fuente de iluminación Photocrescenta de 75W a diferentes distancias.

3.2.2. Lámparas halógenas

Con las lámparas halógenas se logra un muy superior rendimiento y se mantiene constante la composición espectral. Se distinguen por tener un elemento halógeno como el yodo, que forma parte de un ciclo muy interesante: al evaporarse el tungsteno del filamento, en lugar de depositarse en las paredes del bulbo, se combina con el halógeno, formando halogenuro de tungsteno que, a su vez, por el calor del filamento, se deposita en este. Por esa razón, el filamento conserva siempre su mismo grosor e irradia una temperatura color constante que varía entre los 3.000° y 3.400°K. Existen diferentes tipos para diversas aplicaciones: con forma de tubo, en "U" y de bulbo (**Halolux y Cromalita**).



Figura 38: Luxes observados utilizando como fuente de iluminación Halolux de 150W a diferentes distancias

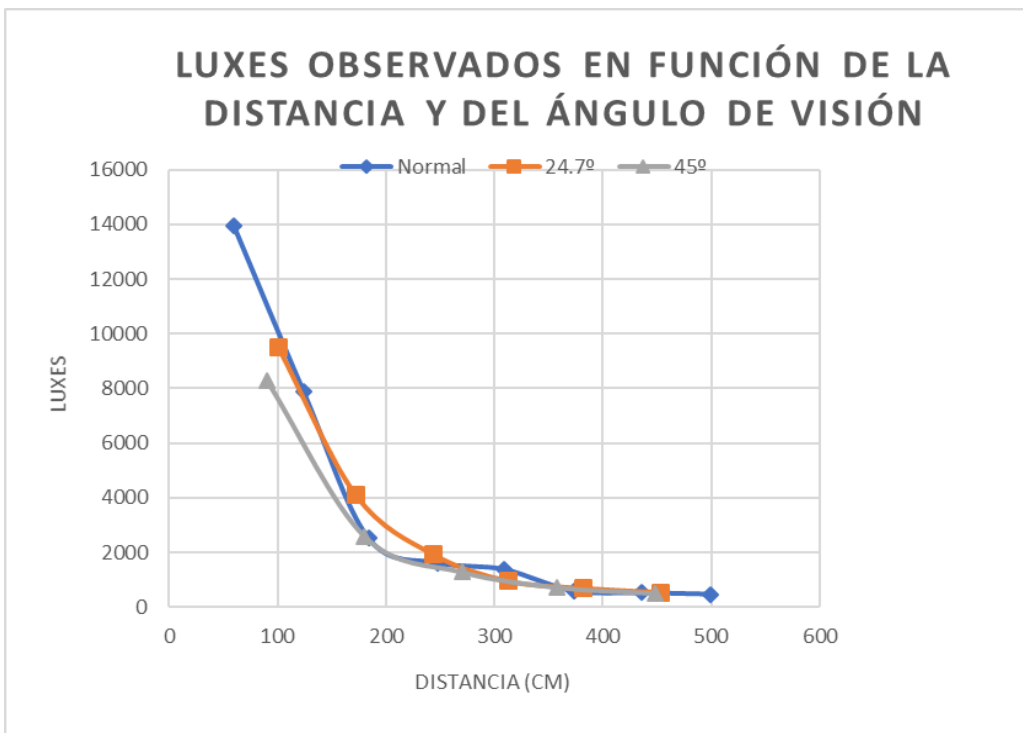


Figura 39: Luxes observados utilizando como fuente de iluminación Cromalita de 250W a diferentes distancias.

3.2.3. Lámparas infrarrojas

Son un tipo de lámpara incandescente reforzada con propiedad de radiación infrarroja. Emite menos rayos visibles que una lámpara normal, pero la lámpara infrarroja está diseñada para transformar energía de entrada en rayos infrarrojos con energía térmica y tener una mayor vida. Normalmente utilizan filamentos de tungsteno, por ser más eficientes que las de microbio. Se han empleado dos lámparas infrarrojas de diferente voltaje.

La cueva se caracteriza por permanecer en un ambiente de ausencia de luz, que junto con las condiciones de temperatura y humedad ha permitido a las pinturas preservarse hasta la actualidad.

La reflectografía infrarroja se caracteriza por ser un método no intrusivo. Esto significa que no ha de ser nociva ni entra en contacto con el elemento a medir.

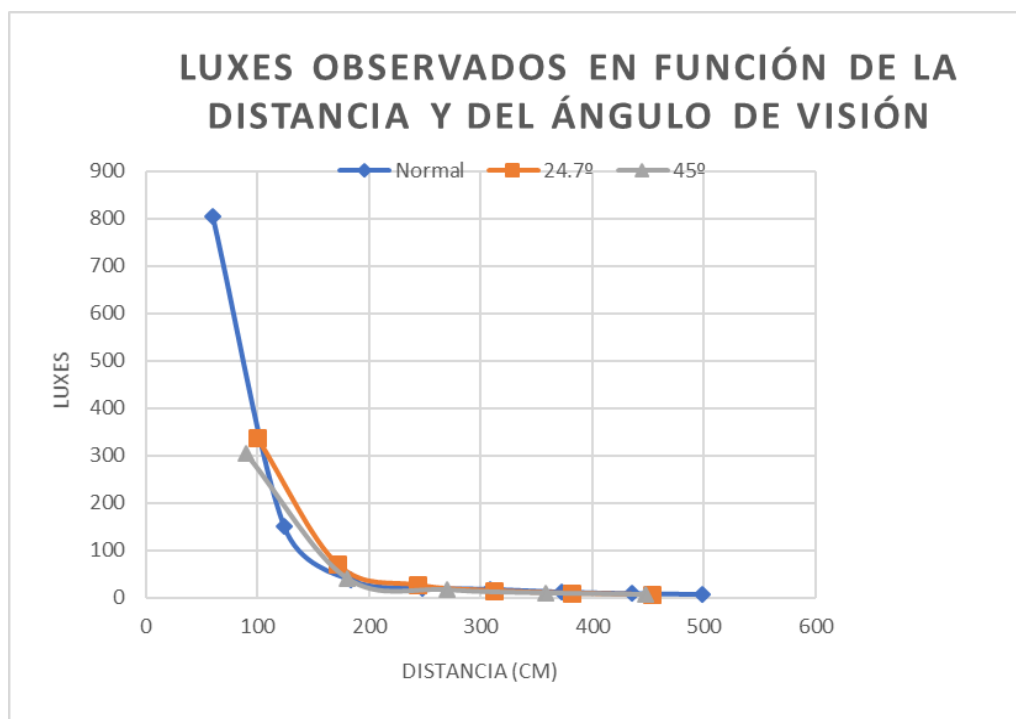


Figura 40: Luxes observados utilizando como fuente de iluminación Infrarroja de 150W a diferentes distancias

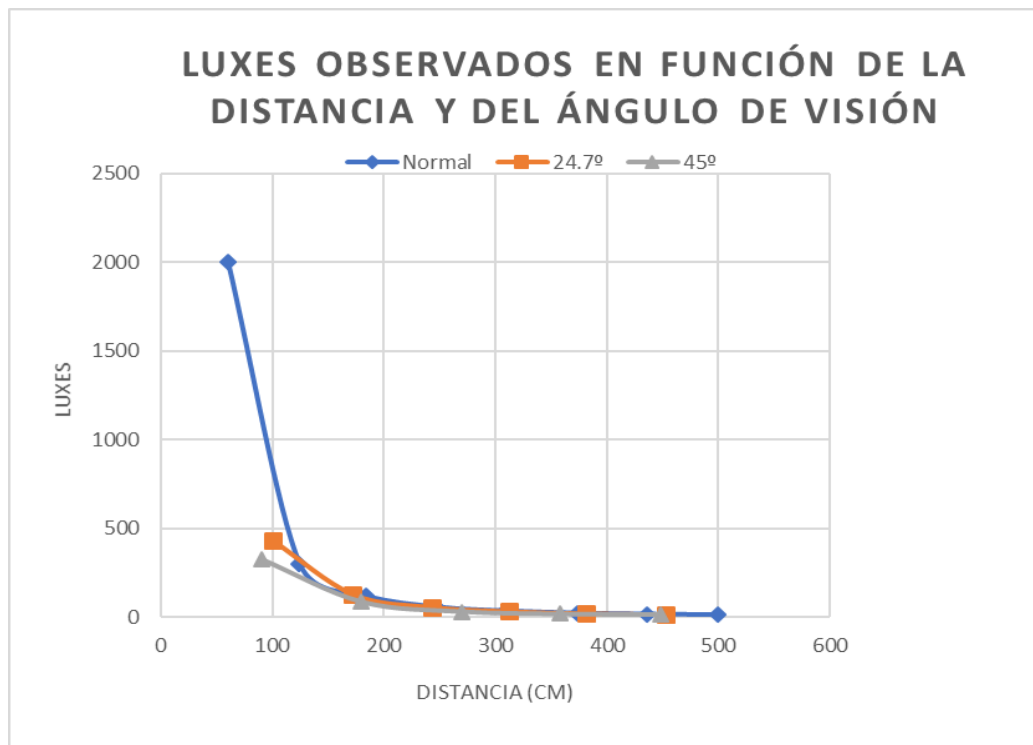


Figura 41: Luxes observados utilizando como fuente de iluminación Infrarroja de 250W a diferentes distancias

3.2.4. Lámparas Fluorescentes

Se determinó el espectro de emisión de lámparas compactas fluorescentes; concretamente el modelo Philips “Tornado” de tipo helicoidal de 23W.

Capítulo 4: Buenas prácticas para la captura de información radiométrica en arte rupestre

4.1. Metodología propuesta

Las presentes buenas prácticas por su contenido se enmarca en una propuesta metodológica cualitativa ya que no cuantifica variables, además se caracteriza por ser exploratoria en función de los niveles de categorización mencionados por Sampieri, *et al.*, (2006), “Los estudios exploratorios se efectúan, normalmente, cuando el objetivo es examinar un tema o problema de investigación poco estudiado o que no ha sido abordado antes.”, por lo tanto fortalecido por la revisión de literatura se enmarca en un tipo de estudios exploratorios, que nos sirve para familiarizarnos con fenómenos relativamente desconocidos, teniendo como conclusión la posibilidad de llevar a cabo más investigaciones avanzadas sobre los fenómenos relacionados al tema.

Con el fin de disponer de un manual de buenas prácticas para la captura de firmas espectrales con un espectro radiómetro de campo, es necesario estudiar los fundamentos de esta tecnología (espectro-radiometría), por lo que es inevitable auxiliarse de un respaldo bibliográfico reciente.

Al realizar un estudio detenido de los diferentes manuales de usuario del instrumental, nos permitimos identificar todos los componentes físicos, como los requerimientos de software, de manera que se traduzca en un protocolo el cual permita cubrir todos los requerimientos del sistema para capturar información.

Con las pruebas se llega a proponer y afinar protocolos creando la posibilidad de pensar en un post-proceso de la información, con los primeros datos obtenidos se tratará de construir firmas espectrales, asumiendo que toda la información recolectada en trabajos de campo necesita un cierto grado de post-proceso, deberemos identificar esas necesidades de post-proceso para nuestra información.

Cuando se llegue a proponer un manual de buenas prácticas, para capturar información espectral, se realizan pruebas de campo para probar el manual propuesto y su correspondiente post-proceso. Esto implica identificación de áreas a ser muestreadas, delimitación de dichas áreas, encontrar un procedimiento que permita el cálculo y distribución de muestras, además de realizar análisis de características generales de las firmas obtenidas. Permittiéndonos de esta manera con

todos los resultados y experiencias obtenidas, dar a conocer a grupos de interés, los alcances que podemos conseguir con esta tecnología.

4.2. Equipamiento

4.2.1. Espectroradiómetro de campo

4.2.1.1. Descripción general

El equipo para mediciones espectrales se encuentra conformado por sensores y cables conectores que se detallan en la presente tesis, a pesar de que el equipo está reforzado para soportar condiciones de exteriores, con los cables se debe tener mucho cuidado en vista de que cada pieza es de vital importancia para su funcionamiento porque cualquier alteración o ausencia de los mismos impide realizar la captura.

BLACK-Comet BLK-C-SR y DWARF-Star Miniature

Estos dos sensores, BLACK-Comet BLK-C-SR (color negro) nos permite medir longitudes de onda de 200 a 1080 nm, y el DWARF-Star Miniature (color rojo), longitudes de onda de 1000 a 1700 nm, ambos sensores comparten características similares de fabricación como son:

- Coraza protectora

Los sensores individualmente están sujetos a una estructura protectora que la llamaremos coraza protectora, esta coraza nos permite el transporte normal del equipo tanto en actividades de campo como actividades de laboratorio, asegurando su integridad previniendo daños graves contra golpes y daños físicos.

- Rosca de comunicación

En la vista frontal de los espectro-radiómetros podemos observar que se encuentra una rosca cubierta con un capuchón negro de protección (SMA-905), esta rosca nos permite la comunicación del sensor con la fibra óptica.

- Foco tipo LED (verde)

En la parte delantera encontramos un foco tipo led de color verde, el cual nos indica cuando el sensor está listo para comunicarse con el ordenador.

- USB hembra tipo B

En la parte posterior de los espectro-radiómetros se encuentra una ranura con un puerto USB hembra de tipo B donde conectaremos el cable para comunicar el sensor con el ordenador.

Fibra Optica F600-Y-UV-SR-NIR

La fibra óptica permite dirigir la luz o la cantidad de energía que reflejan los cuerpos hacia los sensores del espectro-radiómetro, es decir ayuda a dirigir la luz para que traduzca la energía en una respuesta espectral, esta fibra óptica está construida de tal manera que permita el uso de ambos sensores al mismo tiempo, su forma es de tipo SMA-905 y tiene una longitud de 1 metro.

La fibra viene protegida por un juego de tres pequeños cauchos, tanto los extremos de los dos brazos cortos como el final de la fibra.

Además, cada brazo de la fibra posee una codificación a manera de membrete que permite la identificación de cada brazo con su respectivo sensor.

Cable USB

El equipo dispone de 2 cables USB que nos permite la comunicación de los sensores con el ordenador, estos cables se caracterizan por poseer un extremo con USB macho tipo A y el otro extremo con un USB macho tipo B, con una longitud de 2 metros.



Figura 42: Componentes del Espectroradiómetro de campo

4.2.1.2. Procedimiento para las capturas de las firmas espectrales

Antes de proceder a explicar el procedimiento para la captura de información espectral es necesario que se describan algunos términos a manera de glosario para este tema en particular:

- *Referencia al blanco:* Una referencia al blanco significa que en el modo de lectura de Transmitancia/Reflectancia, son requeridos estos valores, con la lógica que un blanco de

referencia siempre reflejara el 100 de la energía incidente en ese momento, por lo que con diferentes condiciones de luz siempre será necesario que se actualice la referencia al blanco, más o menos vendría a ser la calibración del equipo para las condiciones del momento a la hora de capturar información espectral.

- *Referencia al negro:* Una referencia al negro junto con la referencia al blanco marca un punto de partida de encendido del equipo, por lo general las variaciones de referencia del negro comparadas con el blanco no son significativas. Para realizar esta función se deberá obstruir toda posibilidad de ingreso de energía al sensor.
- *Nivel digital:* Conocidos como “ND” en inglés, este término corresponde a las lecturas en bruto del sensor y que transmite al ordenador, estos valores no tienen una unidad de medida, no representan la firma como tal, sino simplemente corresponden a la señal original que luego será interpretada y traducida por el software para darnos valores de reflectancia, o absorbancia, o cualquier otra opción de medición que necesitemos.
- *Reflectancia/Transmitancia.* Dentro de los softwares especializados, podremos escoger diferentes funcionalidades, sin embargo, la que nos interesa son las lecturas de reflectancia, conocidas también como transmitancias.

Estos valores de reflectancia se expresan en porcentaje o en una escala referente a uno, y son el resultado de la relación entre el total de la energía incidente dividido para la energía total reflejada.

- *Tiempo de integración:* Comparado con una cámara fotográfica, el tiempo de integración correspondería a la apertura del lente para que ingrese la luz al sensor que captura la foto, de igual manera el tiempo de integración es de vital importancia para evitar saturaciones en las lecturas de energía, por lo que a menor tiempo de integración son lecturas más rápidas y transmite inmediatamente la cantidad percibida, sin embargo si existiera un aumento de energía, esto podría ocasionar que el sensor se sature por lo que con tiempos de integración más amplias permitimos que el sensor realice promedios antes de enviar su señal.

La unidad de media del tiempo de integración son milisegundos por lo que se traduce en el periodo de tiempo que le permitimos al equipo hacer promedios de lecturas antes de ser enviadas al ordenador.

- Captura de información espectral: Una vez explicados algunos términos procederemos a explicar cuál es la secuencia de pasos para capturar información espectral, con ayuda del software SpectraWIZ.

Luego de realizar todo el proceso de montaje del equipo deberemos proceder de la siguiente manera.

Paso 1. Comprobar conexión.

Una vez conectados los espectro-radiómetros al ordenador deberemos comprobar que los leds verdes se hayan encendido correctamente.

Luego se inicia el programa previamente instalado SpectraWiz, cuando realizamos esta acción por primera vez deberemos observar una ventana emergente que nos indicara que se han detectado dos puertos USB y que se han generado dos rutas de acceso, caso contrario si no se observa dicho mensaje es probable q existe algún error de comunicación.

Es necesario mencionar que el software guarda una ruta específica para cada puerto USB en relación al radiómetro, por lo que en caso de que, en una siguiente ocasión, no se conectan los espectro-radiómetros en los mismos puertos, generaran errores e incoherencias en las lecturas.

En caso de que suceda este error se deberá cerrar el programa, desconectar los cables USB, e ingresar al software, esta vez nos dirigimos a la pestaña "Setup" y luego la opción "Interface port and detector", ahí una vez más se desplegará una ventana emergente donde nos permite resetear las rutas de los puertos, por lo que deberemos tildar la opción "Reset USB chan Paths", siguiendo el proceso se nos brindará la opción de confirmar el reseteo de las rutas a lo cual aceptamos pulsando "YES".

Hay que considerar que para que las configuraciones tengan efecto se deberá cerrar el programa nuevamente. Concluyendo este punto deberemos conectar los puertos USB, constatar que los leds verdes estén encendidos e iniciar el programa SpectraWiz.

- Paso 2. Configuración para la toma de datos

Dentro de todas las opciones que nos brinda SpectraWiz, detallamos a continuación únicamente las que usaremos para capturar respuestas espectrales de pigmentos.










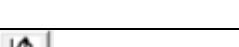

	Botón de Abrir archivos, nos permite buscar dentro de un árbol de carpetas, archivos con información espectral.
	Botón Guardar
	Botón Imprimir
	El botón Snapshot, nos captura una imagen instantánea que se esté visualizando, para liberar el snapshot, damos clic en "run".
	Este botón tiene una función extra ya que nos permite hacer capturas de pantalla.
	El botón guardar espectro negro nos permite realizar la calibración al negro para capturas de reflectancia. Al dar un clic izquierdo calibramos al negro y al dar un clic derecho liberamos el negro, para continuar con la calibración.
	Los botones de movimiento de datos nos permiten colocar una línea a lo largo de las mediciones y nos permiten leer valores de reflectancia en sitios específicos.
	El botón de zoom nos permite ajustar la vista
	El botón de auto escala nos permite ajustar la escala automáticamente a las lecturas, para su mejor visualización
	Los botones para la Integración de tiempo, permiten ajustar los valores en milisegundos acorde a las condiciones de capturas de información, ayudándonos a evitar saturaciones del sensor.
	Las opciones de medición solar, color, y métodos químicos, son utilidades adicionales para el espectro radiómetro.

Figura 8: Opciones para la captura de firmas espectrales de pigmentos

Con el fin de capturar datos deberemos previamente realizar el montaje del equipo para lo cual seguimos todos los pasos mencionados anteriormente, luego de tener iniciado el programa deberemos observar dos líneas, una de color azul y otra de color rojo la línea de color azul corresponde al sensor BLACK-COMET, y la línea roja corresponde al sensor Dwarf-star.

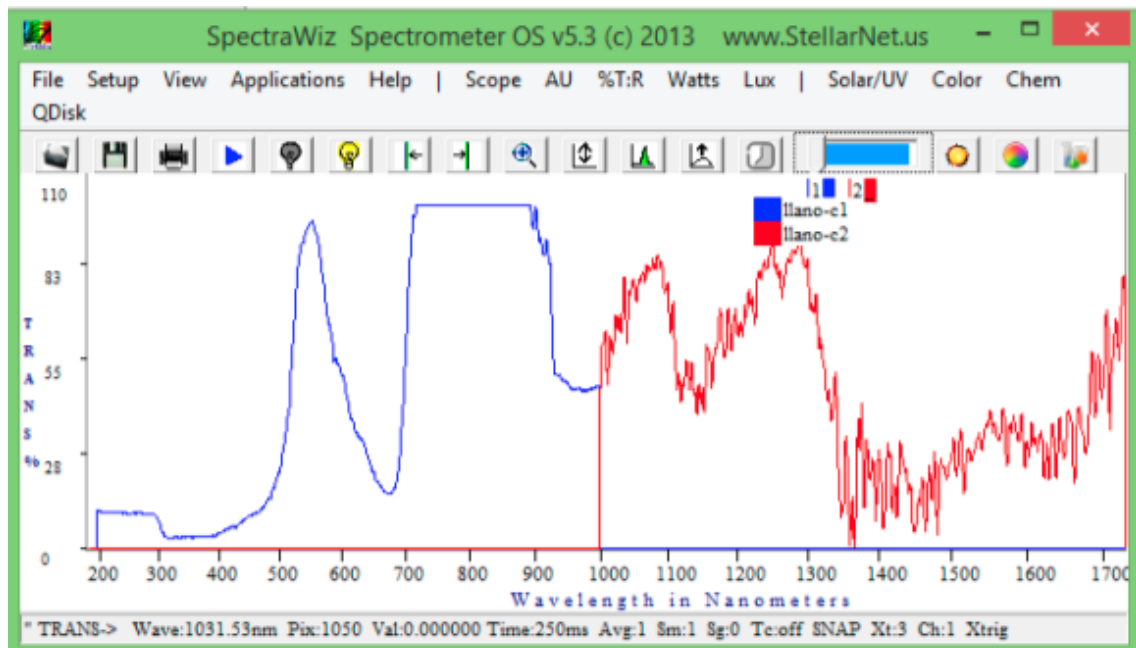


Figura 43: Captura de pantalla del software SpectraWiz Sectrometer v5.3

- Paso 3. Opción de Reflectancia

Debemos escoger la opción propia de medidas de reflectancia, esta opción la podemos encontrar en la barra de menús con el nombre “%T:R”.

- Paso 4. Configuración de la toma de muestra

Luego de escoger la opción para medidas de reflectancia “%T:R”, deberemos proceder con la configuración de la toma de muestra, por lo que ajustamos el tiempo de integración, y el número de promedios de la toma según las recomendaciones dadas por StellarNet.

Recomendaciones para ajustar el tiempo de integración con relación al número de promedios.

Tiempo de integración	de	Lecturas promedio
1-100ms		10
100-500ms		5
500+ms		3

O en su defecto hasta familiarizarse con la toma de datos se recomienda ajustar un tiempo de integración de 50ms y 5 promedios, además que en caso de que se llegue a saturar se deberá aumentar el tiempo.

Para ajustar estas características debemos dirigirnos a la barra de menús opción “Setup”, e inmediatamente podremos observar las opciones de “Detector integration time” y “Number of scans to average”, en ambos casos deberemos seguir las instrucciones consiguientes.

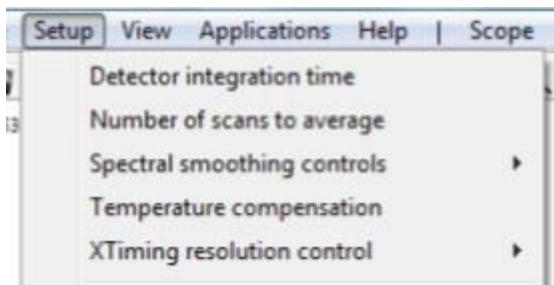


Figura 44: Opciones de tiempo de Integración y número de escaneos para promedio

Cabe mencionar que luego de que se ejecuten cambios en la programación para la captura de información siempre deberá realizarse referencias a negro y a blanco, proceso que describiremos a continuación.

- Paso 5. Referencia al negro y al blanco.

Para calibrar el equipo a las condiciones de luminosidad del momento se deben realizar las referencias al negro y al blanco.

La referencia al negro consiste en una encerada del sistema para evitar ruidos adicionales, esta referencia se la realiza luego de obstruir la entrada de luz a la fibra, para esto se dispone de los cauchos de protección de fibra que resultan convenientes en este proceso, para esto presionamos con clic izquierdo en el botón con el bombillo negro, a continuación deberemos presionar el mismo botón con la diferencia de tener cuidado de presionar el botón derecho del ratón, lo cual permite la liberación del espectro.

Luego de este proceso procedemos a realizar la segunda calibración, la cual corresponde a la referencia al blanco, para esto deberemos usar la bombilla de color amarilla, para la toma de esta referencia se debe liberar el caucho de protección y ubicar una referencia de blanco, lo ideal debería ser poseer un blanco de referencia, sin embargo, para fines funcionales se puede usar hojas de papel bond completamente blancas.

La forma de capturar la referencia al blanco consiste en que deberemos exponer la hoja de papel bond al sol y con el debido cuidado de no proyectar sombra, procedemos a apuntar con el extremo de la fibra, es en esta situación que se deberá presionar el botón con la bombilla amarilla y finalmente quedará listo el sistema para recolectar información espectral.

No hay que olvidar lo que capturamos es información espectral y que para obtener la firma espectral como tal es necesario que esta información sea sometida a un post proceso en una hoja de cálculo, por lo que como insumos para la hoja de cálculo necesitamos tener capturada la referencia al blanco y al negro.

Captura del blanco de referencia.

Para guardar una captura espectral deberemos dirigirnos a la barra de menús en la opción "File", luego escogemos la opción "Save", consecuentemente "Sample", y se abrirá una ventana de exploración direccionada por defecto a C:\Program Files\Stellarnet\SpectraWiz, en donde sugerimos crear una carpeta para cada campaña espectral, codificada de manera que nos resulte fácil nombrarla e identificarla.

Es importante obstruir la fibra con el tapón de caucho y capturar la referencia al negro como una muestra, luego destapamos la fibra y apuntamos a la hoja de papel blanco, con el cuidado de que no se produzca sombra y capturamos la referencia al blanco, luego procedemos a capturar la muestra del objeto del cual se quiere capturar información espectral.

Repetimos esta actividad por el total de submuestras y muestras capturadas, considerando que si las condiciones de luz cambian drásticamente se tendrá que realizar nuevamente las calibraciones al blanco y al negro.

Es importante mencionar que al ser dos sensores los que están en juego, la información que guardemos estará compuesta por dos archivos "-c1" que corresponde al primer sensor y "-c2" al segundo sensor.

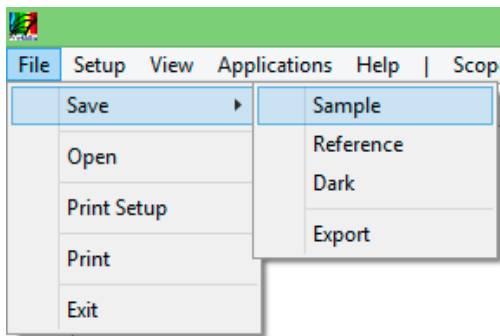


Figura 45: Captura de información espectral indicando su almacenamiento en el ordenador

6.2.1.3. Proceso de validación en campo

Una vez conocida la forma de como capturar datos espectrales con el espectroradiómetro, se nos presenta difícil capturar información espectral de coberturas espectrales tamaño muy reducido como puede ser las bacterias o degradados como pueden ser los pigmentos. En este caso, se diseñó una metodología propia para estas coberturas.

Para la correcta utilización del espectroradiómetro es necesario contar una metodología que nos guíe en campo para capturar información espectral.

Una vez conocido cual es el procedimiento para la captura de información solo nos queda enfocarnos en el estudio del área a muestrearse y en la forma de capturar la información.

Para obtener una firma espectral de una cobertura de soporte que represente un área determinada, en base a las experiencias recolectadas, aprendidas y realizadas proponemos se realice la siguiente metodología con el fin de determinar un área a ser muestreada.

- **Primer paso (campo): Delimitación de áreas.**

Como primer paso procedimos a la identificación de las áreas de las cuales se recopiló información existente, como Localización del panel, descripción del motivo, caracterización del soporte, caracterización técnica y estado de conservación.

- **Segundo paso (Oficina). Cálculo de la población y determinación del tamaño muestral.**

Sabiendo de la tecnología con la que contamos, ésta no nos permitirá capturar información de toda un área, asumimos que es importante la toma de muestras que nos

permitan representar una población; en esa lógica de poder decidir un número de muestras nos auxiliaremos en la fórmula típica para el cálculo de la muestra finita

$$n = \frac{Z^2 p q N}{NE^2 + Z^2 p q}$$

[IV-1]

donde:

N = Tamaño de la población

p = probabilidad de que un evento suceda.

q = probabilidad de que el evento no suceda.

Z = Valor obtenido mediante niveles de confianza. Es un valor constante que. Si no se tiene su valor, se lo toma en relación al 95% de confianza equivale a 1.96 (como más usual) o en relación al 99% de confianza equivale 2,58, valor que queda a criterio del investigador.

E = Límite aceptable de error muestral que, generalmente cuando no se tiene su valor, suele utilizarse un valor que varía. Valor que queda a criterio del encuestador.

Como indica la fórmula para conocer el tamaño de una muestra “n”, necesitamos conocer “N” que corresponde al tamaño de la población, que gracias al levantamiento planimétrico de las áreas a ser muestreadas obtenidas previamente, podemos considerar que nuestras áreas corresponden a nuestra población.

- **Tercer paso (Oficina): Distribución de las muestras**

Una vez calculado el tamaño de la muestra deberemos tratar de distribuirla a lo largo y ancho del área ya delimitada, por lo que proponemos realizar el siguiente proceso auxiliados en un sistema información geográfica, de manera que permita ubicar espacialmente las muestras.

Es así que como insumos se necesita, el área delimitada, la resolución espacial, y el tamaño muestral, sistemáticamente contamos con el área medida para zona de trabajo, contamos también con el valor de resolución equivalente a terreno, y el valor anteriormente calculado.

Con todos los insumos mencionados anteriormente nos auxiliamos de un entorno SIG, en donde aplicaremos un geo-proceso en el que marcaremos el muestreo realizado.

- **Cuarto paso (campo): Método para recolección de datos**

Luego de recolectar y realizar los cálculos de todos los datos necesarios para el trabajo de campo, solo nos queda conocer la manera de recolectar los datos, es por eso que previamente se realizó el cálculo del campo de visión (FOV) que proyecta la fibra de vidrio, para esto consideramos que el ángulo de la fibra es de 25° y a una altura de 1 cm proyecta en el piso una huella de 4,5 mm

Cabe mencionar que se programó en el software con un tiempo de integración de 100ms y un promedio de 5 lecturas, consiguiendo tiempos de respuesta en pantalla cada medio segundo.

Y finalmente se propone hacer el siguiente proceso para capturar una muestra:

En primer lugar, consideraremos que una muestra abarca 9 mm² y está compuesta de 6 submuestras que abarca 1,5 mm² cada una.

- **Quinto paso. Guardado y etiquetado de información**

Como se mencionó anteriormente cada muestra, estará conformada por 6 submuestras, y cada submuestra deberá ser tomada a lo largo la escena.

Para lo cual en el software deberemos tener creadas las carpetas necesarias en la ubicación por defecto ubicada en C:\Program Files\StellarNet\SpectraWizpara, para almacenar, aquí sugerimos que se cree una primera carpeta con el nombre codificado de la sesión de campaña. En el interior de esta nueva carpeta creamos carpetas con un número igual al calculado para el número de muestras, en secuencia numérica consecutiva, para que finalmente sean almacenadas al interior de cada carpeta 6 submuestras, además de una referencia de blanco y negro de ser necesario para cada una.

1.2.1.4. Post-procesado de firmas espectrales (oficina)

Ya que el equipo captura respuestas espectrales y a nosotros nos interesan valores de reflectancia, todos los valores capturados necesitan ser procesados, para lo cual nos ayudaremos de una hoja de Excel que nos permita realizar algunos cálculos.

Para esto se realizó la configuración de la hoja de tal manera que permita introducir los valores de referencia al blanco, al negro y la submuestra para tener como resultado un gráfico que nos indique la firma espectral.

Todo esto lo podemos realizar gracias a que el formato de archivo en que SpectraWiz guarda los archivos (.TRM), se lo puede abrir y visualizar en una “blog de notas”, o cualquier lector de texto, permitiendo fácilmente la importación de estos valores en las hojas de cálculo.

Cabe recalcar que la importación de los datos se la debe hacer, seleccionando todos los datos dentro del “blog de notas” y copiar, para luego pegarlo en la hoja de cálculo mediante el “Asistente para importar texto”, de tal manera que se peguen dos columnas perfectamente delimitadas, para complementar la información de los dos sensores tendremos que realizar este proceso con los dos archivos correspondiente a cada sensor (-c1 y -c2), el pegado se lo realiza en un archivo a continuación del otro en la hoja de cálculo, y cuando los dos estén pegados procuramos que todos los valores estén expresados en notación numérica normal y no notación científica que es como se guardan los datos por defecto, finalmente para concluir este paso deberemos ordenar la primera columna correspondiente a los nanómetros en orden ascendente es decir de menor a mayor.

El post-proceso como tal consiste en la aplicación de unos sencillos cálculos y el ordenado de la información de tal manera que nos permita organizarnos. Se crearon diferentes hojas dentro de un documento de las cuales la primera corresponde a la referencia al blanco nombrada en este caso “Ref”, aquí es en donde deberemos importar la referencia al blanco capturada que corresponda a determinada muestras ya que la referencia cambiará de acuerdo a las condiciones de incidencia de la luz en el momento de la recolección en campo.

De igual manera en la pestaña “dark” deberemos colocar la información correspondiente a las referencias al negro capturadas, por lo general siempre por cada referencia al blanco existe una referencia al negro sin embargo puede darse el caso que lo único q cambia de submuestra a submuestra es la referencia al blanco.

La pestaña “sample” está destinada a ser el sitio donde se importe los datos correspondientes a la representación del objeto a ser muestreado. Y finalmente la pestaña “Post-pro” corresponde a la hoja en la que se conjugan todos los insumos para construir la gráfica de reflectancia y se aplica la construcción de la reflectancia mediante la fórmula “((sample-Dark)/ref)”, con lo que nos permitirá visualizar primero gráficos por separado de los valores ingresados además del resultado.



Figura 46: Hoja de cálculo en la pestaña “Post-pro”

El resultado de todo este proceso se expresa en la última pestaña nombrada “Firma espectral”, en donde se muestra únicamente los valores y la gráfica de los resultados, permitiéndonos copiar o exportar los valores obtenidos como resultado.

1.2.1.5. Almacenamiento de Firmas Espectrales

Como se mencionó anteriormente los datos capturados presentan submuestras parciales, por lo que después del post-proceso realizado a todos los valores de las submuestras, se deberá promediar todos los valores para obtener un único resultado que será nuestra firma espectral, es por tanto que para el almacenamiento de dicho resultado proponemos el uso de un metadato.

- **Metadato Espectral**

Los metadatos forman parte primordial en temas de adquisición de información, en especial información de campo, esta información nos permite generar una base de datos que catalogue la información proveniente de instrumentos que dependen de muchas condiciones para tomar una muestra, como es el caso de los espectro-radiómetros.

Pero, ¿Por qué necesitamos metadatos para las firmas espectrales?, simplemente nos hacemos a la idea de que cuando se captura firmas espectrales se realiza campañas en campo

en la que se captura la reflectancia espectral de diferentes objetos (materiales, pigmentos, bacterias, soportes, suelo, etc.), y por la naturaleza heterogénea de las variables que influyen en la captura de dichas firmas es necesario contar con información auxiliar que nos permita conocer información con datos tales como: en donde fue tomada, a qué hora, condiciones, y cualquier información que requiera ser observada para el correcto entendimiento, y no solo ese instante sino para que cualquier técnico pueda hacerse a la idea de dichas condiciones.

Es por eso que para nuestra investigación hemos diseñado una ficha en la cual podremos guardar información que nos permita entender bajo qué condiciones fueron tomadas nuestras firmas, a continuación, detallamos más partes que consta en nuestra ficha.

- 1.1 Modelo del espectro radiómetro con el cual se ha levantado la firma espectral,
- 1.2 Nombre del técnico responsable de la operación en campo
- 1.3 Fecha a la cual se captura la firma
- 1.4 Hora a la que se captura la firma
- 1.5 se debe especificar que objeto se muestrea sea pigmento, bacteria, soporte, etc.
- 1.6 Describir características tales como observaciones del objeto muestreado refieren a la codificación con las que se almacenarán nuestras firmas es decir sugerimos que para la campaña de captura se genere un código de identificación y se complemente con el número de muestra o firma capturada.
- 2.1. georreferenciación de la muestra, que nos permitan ubicarnos geográficamente.
- 3.1 y 3.2 se permite colocar imágenes primero del objeto a ser muestreado y luego del objeto en la fase de muestreo, este último en especial nos permitirá observar la forma o método con el cual fue capturada la firma espectral.
4. Condiciones ambientales
 - 4.1 temperatura en °C,
 - 4.2 Humedad,
 - 4.3 Nubosidad (en zonas con luz natural),
 - 4.4 Radiación Solar (en zonas con luz natural),
 - 4.5 Heliofanía (en zonas con luz natural),

4.2.2. Sensores

4.2.1.1. IRCAM-GIM

Consiste en un prototipo que desarrolló GIM Geomatics en colaboración con la empresa alemana IRCAM GmbH. Es un sensor multibanda, en el que es posible configurar 6 bandas. En los ensayos se emplearon 2 configuraciones; la primera configuración estaba orientada a la captura de datos en el infrarrojo medio, en donde aparecen mezclados procesos de reflexión y de emisión en porcentaje variable en función de la parte del espectro donde se observe. Para la observación se empleó un objetivo de una aleación de Mg O de 50 mm de distancia focal que presenta una ventana de observación entre 2.000 y 4500 nm y se registraron las siguientes longitudes de onda: 2,2 μ m, 2,5 μ m, 3,05 μ m, 3,8 μ m y 4,6 μ m.

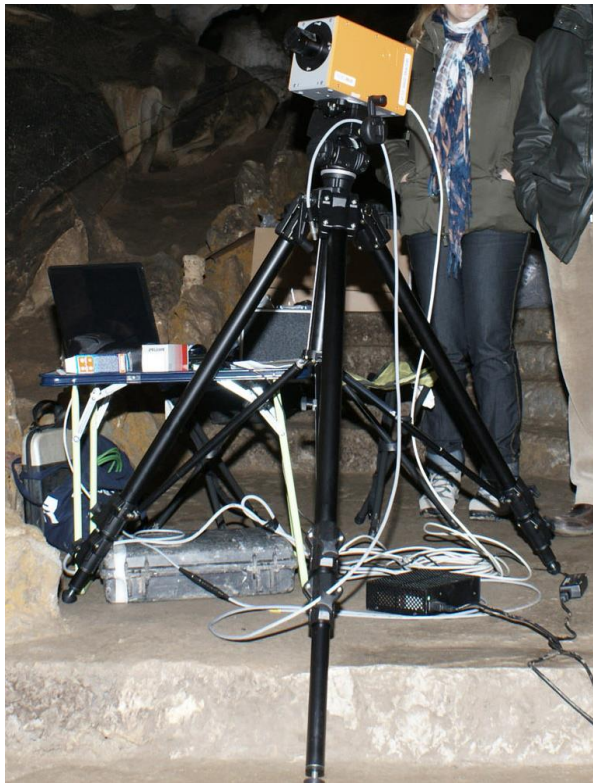


Figura 47: Prototipo multibanda IRCAM-GIM

En el segundo ensayo, se optó por observar longitudes de onda más cortas. Para ello fue necesario recurrir a una óptica abierta, un telescopio de Galileo de 500mm. En estas

longitudes de onda, predominan las reflexiones y las longitudes de onda empleadas fueron: $1,56\mu\text{m}$, $1,75\mu\text{m}$, $1,95\mu\text{m}$, $2,2\mu\text{m}$ y $2,5\mu\text{m}$



Figura 48: Sensor IRCAM GIM con óptica abierta funcionando en el interior de la cueva.

4.2.1.2. MUSIS HS

Se trata de una cámara de Multiespectral capaz de registrar información en una amplia gama espectral desde 370 nm (UV) a 1.000 nm (infrarrojo cercano).

De dicho espectro, se registraron 28 bandas, con un ancho espectral de 30 nm; No se registraron las bandas con las lentes no operativas, que no permitían enfocar con nitidez con la óptica empleada. El sensor MUSIS HS es un sensor CCD progresivo, que permite generar imágenes de 1600x1200 píxeles a 8 bits. Necesita una iluminación mínima de 0,001 lux ($f/1,2$, 2800 K). Desde el punto de vista técnico se realizaron pruebas con diferentes ángulos de incidencia de luz.



Figura 49: Equipo MUSIS HS empleado

4.2.1.3. SPECIM V10E

Este sistema hiperespectral analizado está compuesto por una cámara monocromática de 16 bits (resolución 1600 horizontal x1200 vertical - 30 imágenes por segundo), un espectrógrafo (ImSpector V10E), un objetivo (Cinegon 1.8/16) y un sistema mecánico móvil que permita realizar un escaneado lineal de la escena completa

Es sistema se trata de un barredor mecánico de los denominados *pushroom*. Sus características técnicas son:

Tabla 6: Características técnicas del sensor hiperespectral Specim V10E

ImSpector Características ópticas	V10E
Rango espectral	400 - 1000 nm
Dispersión	97.5 nm/mm
Resolución espectral	2.8nm (con abertura de 30mm)
Tamaño de imagen	máx. 6.15 (espectral) x 14.2 espacial mm
Resolución espacial	rms del radio del punto < 9 mm
Aberraciones	Sin astigmatismo
Doblado de las líneas espectrales por el eje espacial	Smile < 1.5mm

Doblado de las líneas espectrales por el eje espacial	Keystone < 1mm
apertura numérica	F/2.4
Ancho de ranura, por defecto	30mm (13, 18, 50, 80 and 150mm)
longitud de hendidura	14.2
entrada óptica	Telecéntrico
eficiencia	> 50%, polarización independiente
Luz extraviada	< 0.5% (lámpara halógena, filtro de muesca de 633nm)
Características mecánicas	
Tamaño, OEM	(W) 60 x (H) x 60 x 175mm
Peso	1100g
Cuerpo, OEM	Aluminio anodizado
Montaje de cámara y lentes	Adaptador estándar C-Mount
Características medioambientales	
Almacenaje	-20 ... +85 °C
Rango operativo.	+5 ... +40 °C, sin condensación

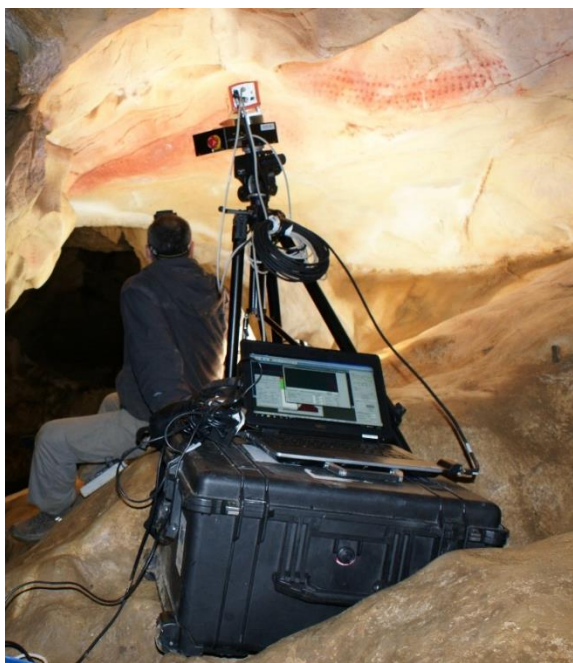


Figura 50: Equipo Specim V10E empleado en la campaña de campo

4.2.3. Fuentes de iluminación.

Se ha valorado emplear diferentes fuentes de luz calibradas con el objeto de alcanzar los 50-70 luxes. Si se considera una fuente de vapor de sodio a baja presión (eficacia luminosa de 150 lm/W) da un resultado de 0,333 W/m², LED ultravioleta e infrarrojo: 0,85 W/m² o Photalita 3W/m².

Se siguieron las recomendaciones de ICOM (*International Council of Museums*), publicadas en *Guidelines for Loans* en el año 1974, que en el epígrafe 9, “entorno físico”, recomienda que los elementos moderadamente sensibles sólo deberían ser expuestos a luz ultravioleta filtrada con una intensidad que no excediese los 150 lux, y para elementos muy sensibles a la luz, no exceder los 50 luxes.

El juego de luces empleado en las campañas de campo estaba formado por el siguiente juego de luces, que fueron calibrados en el rango espectral donde los sensores eran operativos.

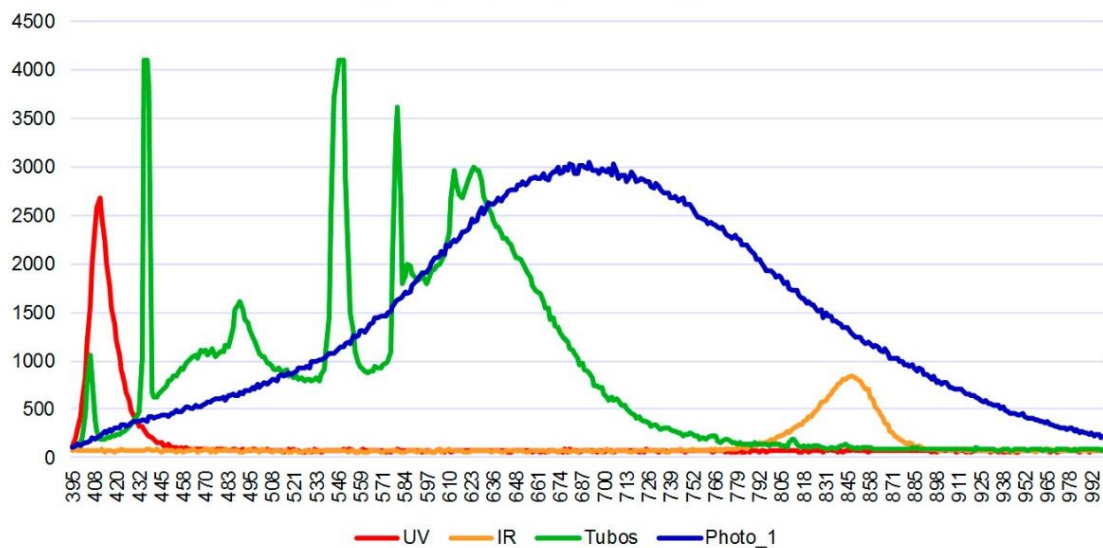


Figura 51: Firmas espectrales de las luces

6.2.4. Sistema de control del impacto de las luces

También hay que añadir en diferentes campañas, hasta estar seguros de que la configuración no alteraba el medio, se decidió registrar datos mediante una cámara termográfica. Para la captura de los datos se ha empleado la cámara FLIR-B620, calibrada para trabajar en el rango de temperaturas -20° C a 60° C y una sensibilidad térmica <0.05°C.

Las características de la citada cámara son:

Tabla 7: Características técnicas de la cámara termográfica FLIR T620

Características FLIR T620	
Frecuencia de Imagen	30Hz
Campo de	
Visión/Distancia Mínima	25° × 19° / 0.25 m
Enfoque	Manual/Automático
Resolución IR	640 x 480
Rango Espectral	7.8–14 μm

Y se ha empleado para comprobar que no se alteraba la temperatura del soporte más de 0,1°C durante el experimento.

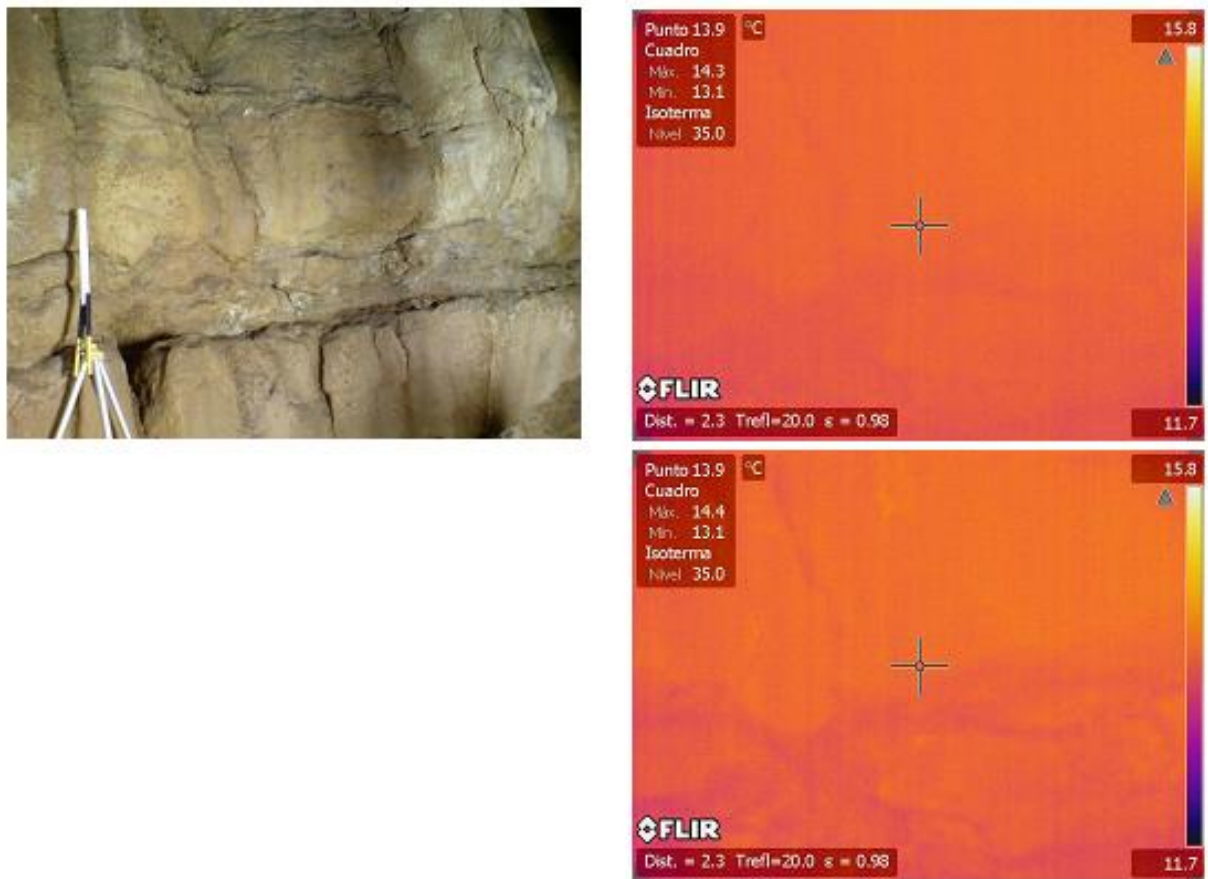


Figura 52: Imagen termográfica correspondiente a antes y después de la toma.

4.3. Conclusiones

Se han realizado diferentes campañas de campo a lo largo del tiempo, en las que además de la campaña del espectroradiómetro, los datos registrados en las zonas de prueba fueron registrados mediante al menos un sensor de los anteriormente citados y empleando una combinación de luces tipo LED, tubos de luz y photolitas/tungsteno para disponer de energía en la totalidad del espectro. Los paneles registrados también fueron registrados mediante láser escáner 3D que se empleó para dar georreferenciar el modelo. Posteriormente se describirá el proceso seguido.

Capítulo 5: Metodología para la captura de información métrica y radiométrica

5.1. Ámbito de aplicación

El estudio se ha centrado en la cueva de El Castillo, la cual presenta una gran diversidad del arte rupestre del Paleolítico Superior, quizás el más amplio de Cantabria, 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*).

La selección de los yacimientos se basa en la idoneidad de los casos para la aplicación de las nuevas herramientas. Se han buscado, en consecuencia, sitios que reúnan las siguientes condiciones: conjuntos de evidencias que hayan sido estudiados anteriormente y a ser posible revisados posteriormente.

5.2. Captura de información en campo

5.2.1. Selección de las zonas de estudio en cueva

En la cueva de El Castillo existe una gran diversidad del arte rupestre paleolítico, 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.




Figura 53: Gran Sala de la Cueva de El Castillo


Se procedió a elegir diferentes unidades gráficas que se adecuasen a los objetivos y requisitos del proyecto, atendiendo siempre en primer lugar a criterios de conservación.

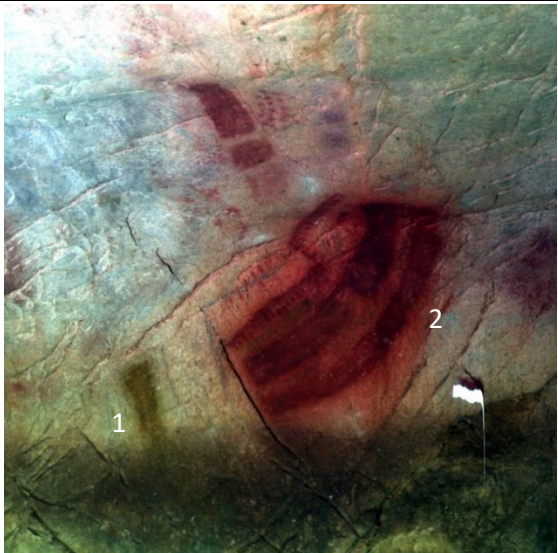


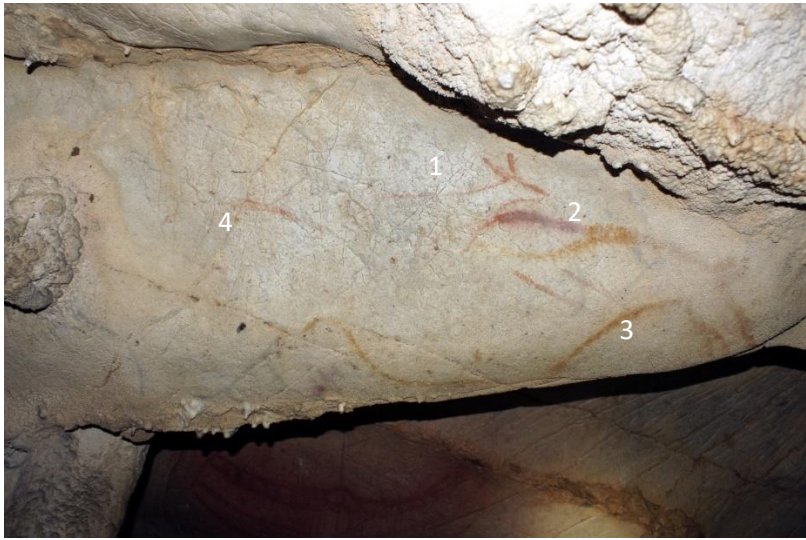
Figura 54: a) Vista del modelo 3D del panel de las manos. b) Ortoimagen generada para registrar todos los datos hiperespectrales.


Los paneles elegidos de esta cueva son:


Zona de Trabajo -1	
Localización	
Cueva de El Castillo: Panel de las manos, en la pared izquierda.	
Descripción del motivo	
Cabeza de cierva con el interior estriado y trazo lineal rojo.	
Caracterización del soporte	
Motivo realizado sobre caliza. El soporte se encuentra seco.	
Caracterización técnica	
La cierva ha sido trazada mediante grabado múltiple y la pintura roja mediante aplicación probablemente tipo pincel.	
Estado de conservación	
Sin observaciones	Imagen

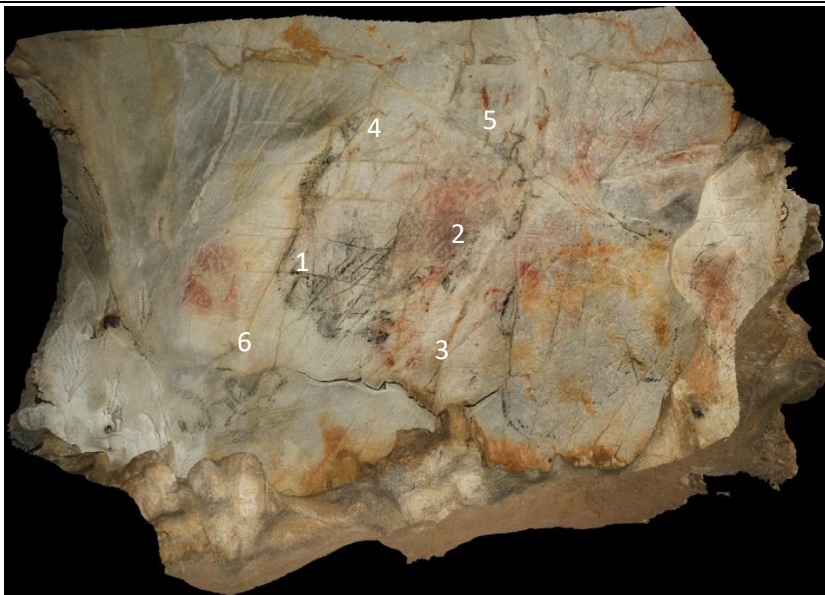
Zona de Trabajo -2
Localización
Cueva del Castillo: Panel de las manos, en el techo, a mano izquierda.
Descripción del motivo
Figura de bisonte compuesto por la totalidad de las líneas de contorno exterior (con referencia al sexo), asociándose a la región de la cara (en su parte baja) dos líneas sinuosas de diferente recorrido.
Caracterización del soporte
Motivo realizado sobre caliza. El soporte se encuentra bastante húmedo (incluso en algún punto puede percibirse una tenue capa de agua) y la parte anterior del animal con recubrimientos de calcita.
Caracterización técnica
Dibujo anaranjado de trazado continuo mediante óxido de hierro.
Estado de conservación
Se asocian al motivo grafitos negros que fueron limpiados.

Imagen

Zona de Trabajo -3	
Localización	
Panel de las manos, en la pared izquierda.	
Descripción del motivo	
Se han incluido dos motivos:	
1: Motivo geométrico rectangular.	
2: Motivo geométrico y lineal complejo formado por dos estructuras rectangulares ligeramente cóncavas y rematadas en la parte superior por pequeños trazos que se asocian a líneas continuas. Probablemente previo al dibujo del motivo se aplicó una ligera capa de colorante rojo al soporte.	
Caracterización del soporte	
Motivos realizados sobre caliza cubierta por una fina capa de arcilla de descalcificación. Ambos soportes se encuentran húmedos.	
Caracterización técnica	
1: Dibujo amarillo de tinta plana mediante óxido de hierro. El motivo dibujado ha sido contorneado sobrepasando mediante grabado de contorno reiterado exteriormente los contornos del dibujo.	
2: Dibujos rojos de tinta plana mediante óxido de hierro. El motivo dibujado ha sido contorneado sobrepasando y superponiendo mediante grabado de contorno reiterado exteriormente a los contornos del dibujo.	
Estado de conservación	
Sin observaciones.	Imagen

Zona de Trabajo -4
Localización
Panel de las manos, en la pared izquierda en la zona de acceso a la galería de la izquierda.
Descripción del motivo
Encima del dorso del caballo (3) hay una pequeña figura de cierva de color rojo (1), incompleta y orientada hacia la derecha como dicho caballo, con cuyo dorso coincide. Mide 20 cm. de longitud. También se aprecia un pequeño caballo infrapuesto (2) al équido amarillo más evidente. Tiene un menor tamaño y está orientado hacia la derecha, aunque la parte anterior coincide prácticamente con el infrapuesto. En la parte izquierda hay un tectiforme sencillo en forma de rectángulo ligeramente curvo (4)
Caracterización del soporte
Motivo realizado sobre caliza. El soporte se encuentra con muy bajo grado de humedad y la parte anterior (sobre todo la cabeza) del animal presenta recubrimientos de calcita.
Caracterización técnica
Dibujo amarillo de trazado continuo mediante óxido de hierro.
Estado de conservación
Sin observaciones.

Imagen

Zona de Trabajo -5
Localización
Panel de las manos.
Descripción de los motivos
Uno de los paneles más complejos de la cueva y posiblemente del arte paleolítico en general. Las distintas técnicas empleadas para la ejecución de las diferentes figuras, así como los diversos colorantes empleados, permiten establecer unas claras diferencias entre cada grupo de figuraciones y a la vez intentar configurar una evolución cronoestilística basada en la estratigrafía de las superposiciones.
Caracterización del soporte
Motivos realizados sobre caliza.
Caracterización técnica
Múltiples técnicas de tinta plana con diferentes pigmentos y grabados.
Estado de conservación
Bastante deficiente con restos de motivos negros que fueron limpiados.

Imagen

Zona de Trabajo -6
Localización
El Túnel, en la pared izquierda.
Descripción del motivo
Tectiforme o ideomorfo de espeso e intenso color vinoso de forma rectangular. En lo que sería el techo hay un solo pequeño resalte. El interior está muy subdividido o compartimentado. Alrededor hay algunos restos de color negro entre los que no se ha sabido identificar ninguna figura.
Caracterización del soporte
Motivos realizados sobre caliza cubierta por una capa calcita.
Caracterización técnica
Dibujo de tinta plana mediante óxido de hierro.
Estado de conservación
Sin observaciones.

Imagen

Zona de Trabajo -7
Localización
Antes del Panel de las manos.
Descripción del motivo
Grupo de bisontes policromos y sus figuras conexas que se encuentran en una especie de suave concavidad de la parte baja del muro. El primero, a la izquierda, en la parte superior, es un típico bisonte altamirense (1), en actitud de saltar hacia la derecha, con las patas recogidas bajo el cuerpo, las pezuñas muy bien indicadas y algunos detalles finamente grabados. También se aprecian unas manos rojas en negativo una en la zona de la cabeza (2) y otra debajo de las patas posteriores (3). En la parte de la giba del bisonte hay dos pequeños dibujos de ciervas con la misma orientación que el mencionado bisonte (4 y 5). A la izquierda hay otra representación de otro bisonte, de estilo diferente, de tamaño mucho menor y muy incompleta (6).
Caracterización del soporte
Motivos realizados sobre caliza.
Caracterización técnica
Dibujo de tinta plana mediante óxido de hierro, pigmento negro y grabado.
Estado de conservación
Bastante deficiente

Imagen

5.2.2. Organización de las campañas de campo.

Dada la gran cantidad de información a capturar, hubo que diseñar con meticulosidad las campañas de campo para reducir al máximo los tiempos de permanencia en cueva.

La digitalización debía incluir tanto información geométrica como escaneados 3D de alta resolución y levantamientos fotogramétricos y microfotogramétricos como temática de los diferentes elementos; esto es, captura de información con alguno de los diferentes sensores multiespectrales o hiperespectrales y capturas con el espectroradiómetro ASD-FR

Analizada la información acerca de la caracterización del soporte y de la técnica artística empleada en los paneles decorados seleccionados, se estableció el protocolo de medición correspondiente en base a lo expuesto al comienzo de este capítulo.

La cueva se caracteriza por permanecer en un ambiente de ausencia de luz, que junto con las condiciones de temperatura y humedad ha permitido a las pinturas preservarse hasta la actualidad.

La reflectografía infrarroja se caracteriza por ser un método no intrusivo. Esto significa que no ha de ser nocivo ni entrar en contacto con el elemento a medir. Tal y como ya se indicó anteriormente, se realizaron una serie de pruebas, para poder determinar la eficiencia de diferentes parámetros de observación.

Tal y como se ha comentado, con el fin de no dañar el arte rupestre, se siguieron las recomendaciones de ICOM (*International Council of Museums*), que recomienda que los elementos moderadamente sensibles sólo deberían ser expuestos a luz ultravioleta filtrada con una intensidad que no excediese los 150 lux, y para elementos muy sensibles a la luz, no exceder los 50 luxes.

A partir de las pruebas de laboratorio, se fijó la distancia mínima a la que debía situarse cada tipo de foco para no ser nocivo ni alterar las condiciones de equilibrio del arte rupestre, considerándose distancias entre 2 y 7 m.

Analizadas dichas variables y los constreñimientos operativos, se establecieron las buenas prácticas de campo para la captura de la información.

Las imágenes multiespectrales se definen como un conjunto de imágenes de la misma escena, pero con cada banda centrada en una longitud de onda diferente. Este conjunto de

datos puede ser procesado para extraer la información relacionada con las variaciones entre las imágenes que no se aprecia cuando las imágenes se observan por separado.

Se realizaron un total de cuatro campañas de captura de datos en diferentes años.



Figura 55: Sensor Specim V10E situado frente a panel

En el proceso de captura se siguieron rigurosamente las conclusiones extraídas en las prácticas de laboratorio.

Se capturó información en el espectro visible, infrarrojo cercano y medio, utilizando para ello diferente instrumentación con el objeto de poder crear un conjunto de datos que analizar en conjunto.

Se registraron respuestas espectrales para identificar las diferencias en pigmentos y poder determinar la cuantía de diferentes empleados. Otros análisis realizados trataron de determinar exceso de pintura, retoques, rotura al grabar, superposición de pinturas, extracción de límites velados o recubiertos por calcita, caracterización de bases y pinturas sobre ellos.

5.3. Procesado de datos

Para el correcto procesado de georreferenciación de los datos de teledetección hiperespectral, es necesario seguir los siguientes pasos.

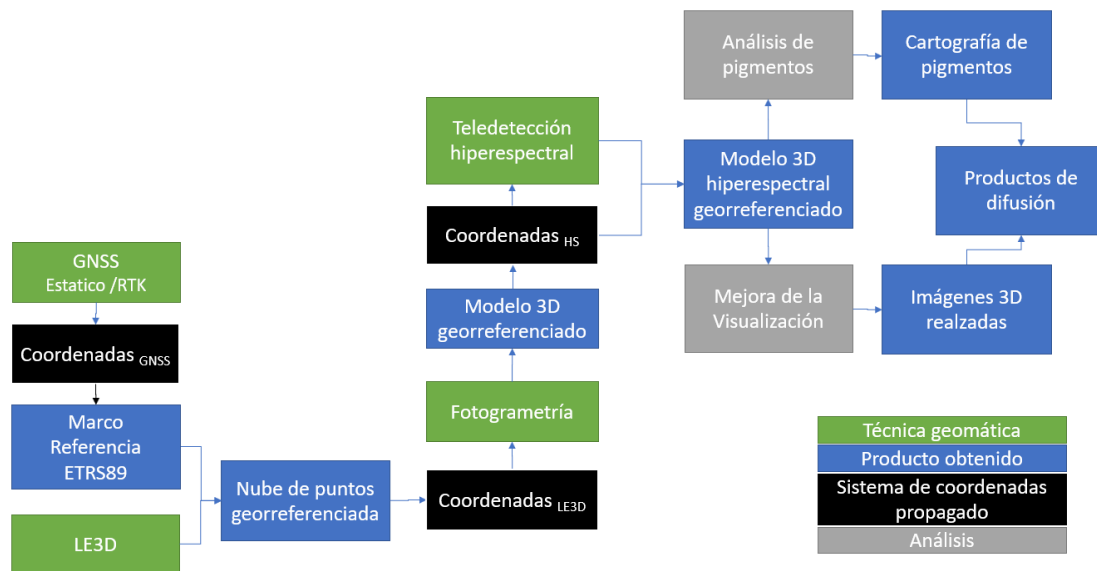


Figura 56: Diagrama general de flujo general para la georreferenciación y procesamiento de datos

5.3.1. Gestión de información métrica de paneles.

Se ha empleado un nuevo método geomático basado en uso combinado de técnicas de fotogrametría apoyadas sobre una base topográfica rigurosa.

El método consiste en realizar una serie de escaneos de muy alta resolución (1 punto cada 2-3 mm) de todo el panel que se ajustan en bloque por mínimos cuadrados y se emplea para apoyar los pares fotogramétricos.

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 todo el panel para analizar las desviaciones respecto al modelo fotogramétrico.

5.3.1.1. Digitalización 3D mediante láser escáner de los paneles.

5.3.1.1.1. Escaneado de las zonas de trabajo

En las diferentes campañas, se emplearon los láseres escáneres 3D de la marca FARO LS 880, Photon 80-120, Focus 3D y el X-130, que ofrece una precisión de 2-3 mm a los 10-25 m, con una reflectancia del 85 %, lo cual permite obtener una serie de puntos que se pueden emplear en el apoyo del modelo fotogramétrico, y que asegure que cumplan con las tolerancias métricas exigidas.

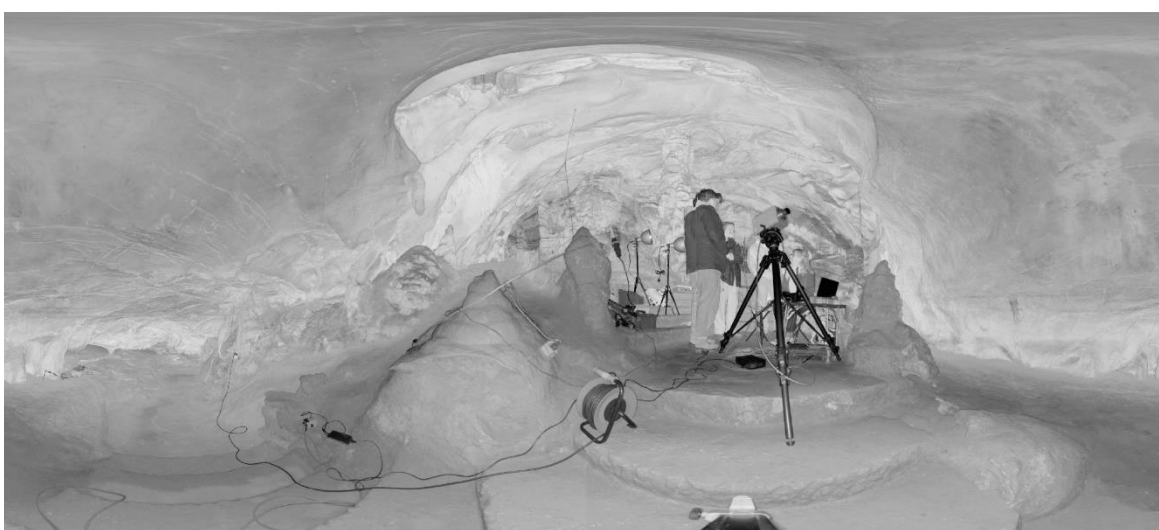


Figura 57: Escaneo realizado mediante el láser escáner 3D FARO Photon 80.

5.3.1.1.2. Preprocesado de los datos: Limpieza y registro.

En esta etapa la información recogida en campo pasa una serie de procesos para filtrar y unir la información en un único modelo:

1. Limpieza: Se elimina toda aquella información que no se desea (ruido), ya sea de forma manual o automática.
2. Registro: Se encuentra la posición y rotación del instrumento para cada barrido en el mismo sistema de coordenadas. Se realiza en dos fases:
 - a. Fase de ajuste grosero: A través de puntos de control, materializados como esferas calibradas y dianas. Con ello se logran precisiones centimétricas.
 - b. Ajuste del bloque: Una vez calculadas las coordenadas de las referencias, se realizará un ajuste en bloque, mediante el sistema de red libre, que

posteriormente se ligará al marco de referencia. Este método permite alcanzar una fiabilidad de unos pocos mm.

3. Optimización del modelo: creación de un modelo homogéneo. El modelo se estructura y divide en partes para facilitar su manejo y comprensión.

5.3.1.1.3. Fotogrametría de los paneles.

Se realizaron diferentes campañas fotogramétricas en las cuatro cuevas objeto de estudio.

Se realizaron diferentes tipos de resoluciones en función de las dimensiones y el nivel de detalle de los paneles que varían entre 100 micrómetros y 1 mm.

5.3.1.1.4. El vuelo fotogramétrico

Se aseguró la cobertura estereoscópica en toda la zona, superponiéndose los tramos adyacentes.

Recubrimiento longitudinal del 80% y transversal del 50%. En los cambios de dirección en la línea del vuelo se solaparon el último y primer fotograma en el 100%.

En el vuelo de obtención de modelos 3D, el solape en el sentido longitudinal alcanzó el 90% y el transversal dependió de la coincidencia de los ejes del vuelo y los que unen horizontalmente los centros de las hojas.

Los fotogramas contarán con un máximo de sombras inferior al 5% de la superficie generada en el fotograma, y se pueda obtener imágenes nítidas y la Zona de ensayo no tenga elementos anormales.

5.3.1.1.5. Equipo fotogramétrico

En función de las necesidades particulares de cada elemento, se ha empleado el siguiente equipamiento fotogramétrico:

- Sony A7 R ii, con objetivos calibrados de 35 y 90 mm.

Se realizó control de la exposición. La resolución radiométrica será de al menos 12 bits por banda.

5.3.1.1.6. Pre-procesado de las imágenes digitales

En varios paneles se realizó un método de gestión de color, con la pretensión de mantener constante el color y su percepción a lo largo de la cadena de dispositivos o aplicaciones en las que se pudiese emplear la información.

La gestión del color actual se fundamenta en las iniciativas y consensos logrados a través del International Color Consortium (ICC), los cuales se centran en los siguientes aspectos:

- El uso de perfiles de color como vía para describir las transformaciones de color. El perfil de color describirá los siguientes aspectos de la imagen: gamut, rango dinámico y reproducción tonal.
- El *Profile Connection Space* (PCS) como estrategia para la transformación de color entre un espacio de entrada y uno de salida.
- El *Color Management Module* como motor o herramienta de transformación de color que se nutre de la información del perfil del color. LA existencia de diversos DMM en el flujo de trabajo puede causar una cierta inconsistencia en la gestión de color, por lo que se optará por emplear Adobe CMM para el uso de aplicaciones gráficas que den soporte a CMM de terceros. De este modo, aun no usando productos Adobe, se puede disfrutar de un mismo CMM para todo el proceso.

La radiometría de las imágenes procesadas ha hecho un uso efectivo de todos los bits según cada caso, evitándose la aparición de niveles digitales vacíos en el caso de la imagen de 8 bits.



Figura 58: Ejemplo de carta de color empleada en campaña de campo.

5.3.1.1.7. Diagrama de flujo fotogramétrico

Una vez registradas las imágenes en campo y gestionado su color, se plantearon las siguientes fases:

1. Registro: Captura de los datos necesarios.
2. Procesado: En esta fase se alinean las tomas fotogramétricas. Se emplearon métodos digitales. Medición de 12 puntos de control mínimo en cada sector. El ajuste del bloque se realizó de forma simultánea por haces de rayos. Se aerotriangularon por completo todas zonas propuestas en el proyecto. Como comprobación del cálculo de la aerotriangulación, se incluyeron puntos de chequeo de precisión al menos 1/3 del RMS final del producto, para ello se empleó la información existente en la nube de puntos.

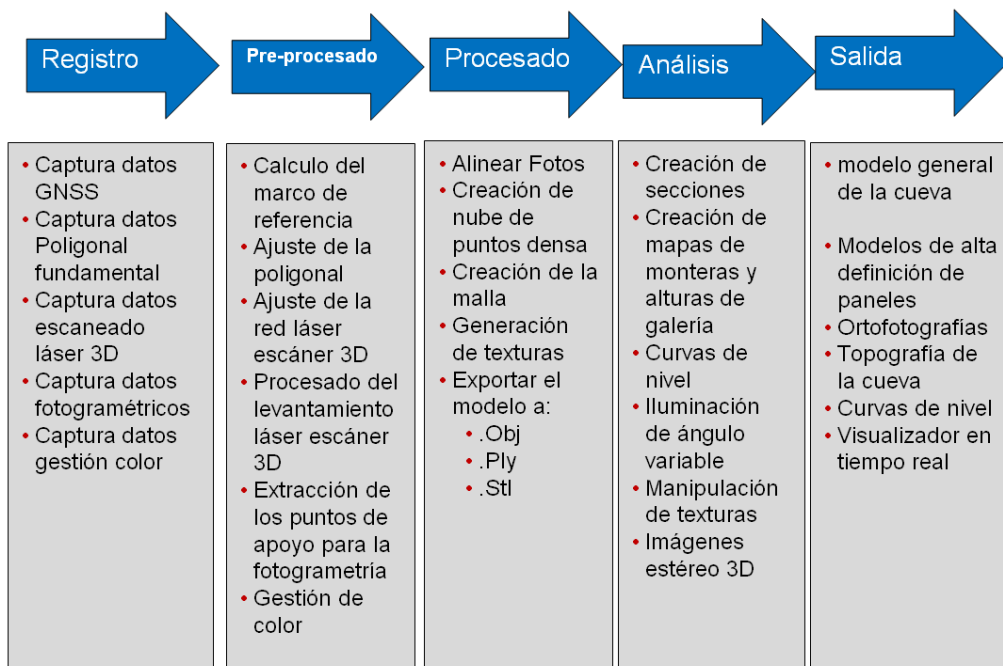


Figura 59: Fases a seguir en el proceso fotogramétrico

5.3.2. Gestión de información radiométrica

A continuación se muestra el diagrama de flujo seguido las correcciones de los datos radiométricos provenientes de los sensores.

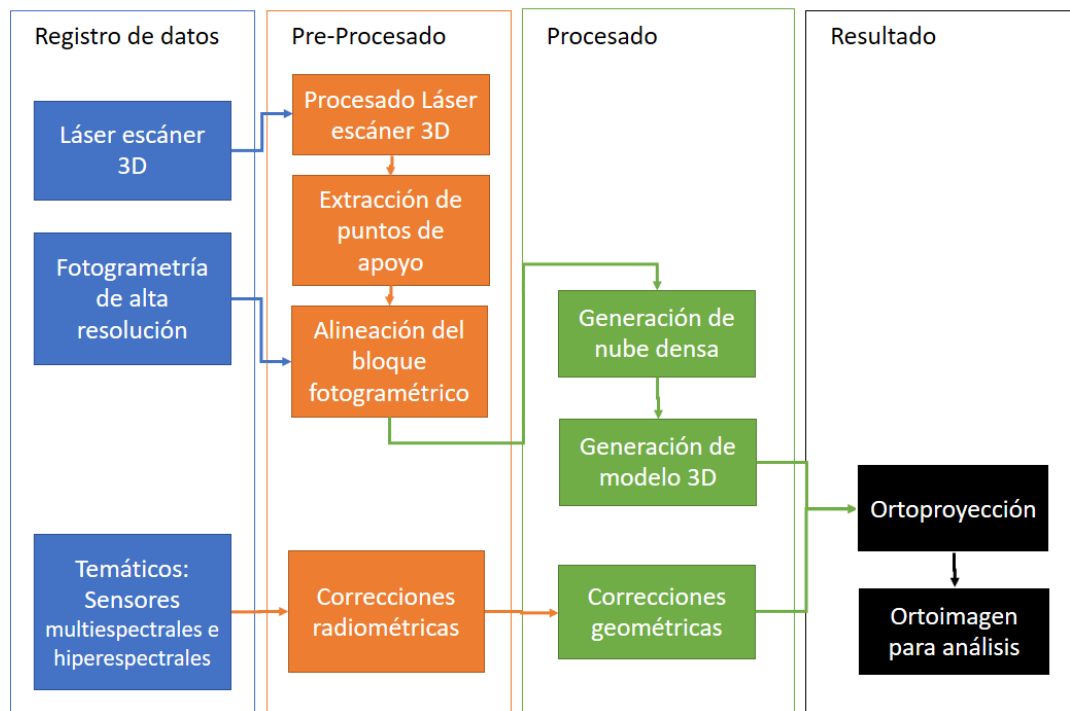


Figura 60: Diagrama de flujo para las correcciones de los datos radiométricos

Calibración radiométrica del sensor.

Este término hace referencia a la relación existente entre la radiancia detectada por el sensor y la señal de salida del mismo. Para que los datos aportados por un sensor sean correctos, dicho sensor debe estar correctamente calibrado radiométricamente. Generalmente se calibran en laboratorio, y se pueden calibrar sus datos con posterioridad mediante el empleo de medidas de radiómetros de campo o el empleo de patrones de reflectancia conocida.

En la figura 59 se muestra una composición RGB (640 nm – 550 nm – 459 nm) y de diferentes bandas separadas 50 nm entre 400 nm y 1000 nm. En las primeras bandas, entre 400 y 550 nm, se aprecian los bisontes.

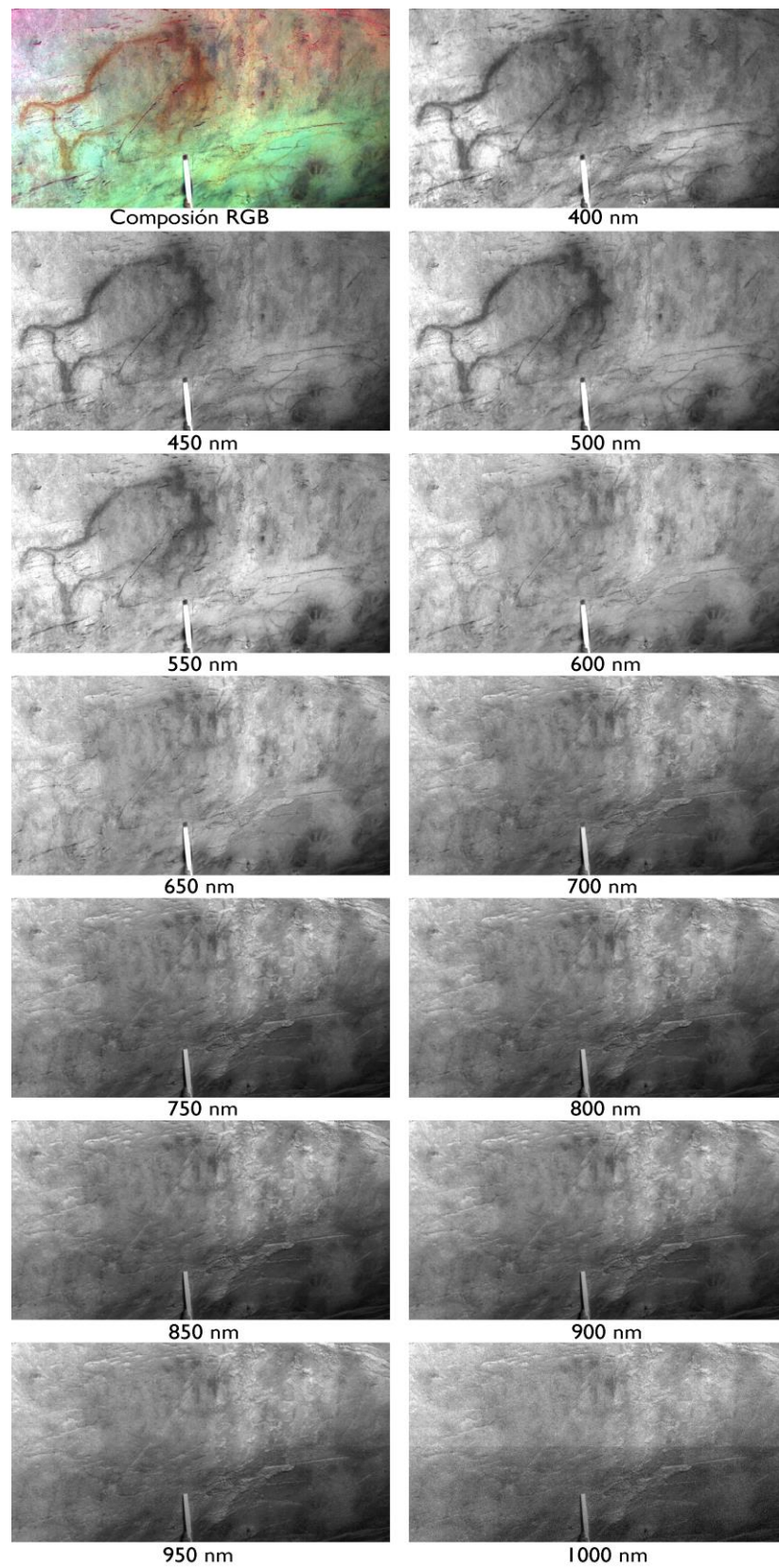


Figura 61: Composición RGB (640nm-550-nm-459nm) de imagen del panel de las manos y diferentes bandas obtenidas cada 50 nm entre 400 y 1000 nm.

Líneas o píxeles perdidos.

Si uno de los detectores deja de funcionar por un tiempo, da como resultado una línea o un pixel en el que no se ha registrado nada o el nivel registrado es anormalmente superior o inferior al resto de los píxeles vecinos.

Se pueden reemplazar los niveles digitales de la línea o píxeles erróneos por los de los precedentes o los siguientes

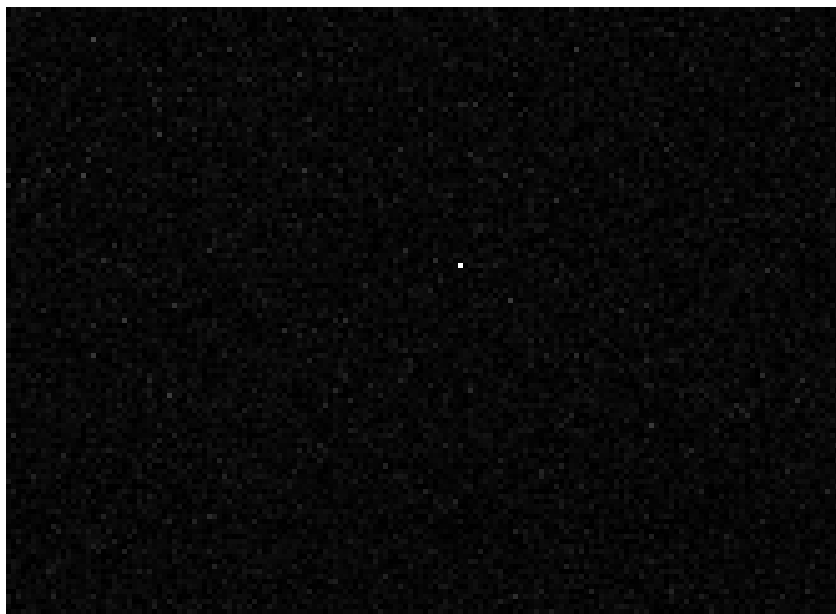


Figura 62: Pixel anómalo en imagen. Se puede apreciar en la parte central.

Registro y Georreferenciación.

La superficie representada en una imagen multiespectral o hiperespectral es el resultado de una proyección cónica que sufre una serie de anomalías o deformaciones respecto a la posición que debía ocupar realmente en comparación con la ortoimagen verdadera obtenida de la integración del láser escáner 3D y la fotogrametría terrestre. Mediante las correcciones geométricas se pretende aminorar estos errores, de tal forma, que la imagen resultante tras estos procesos conserve, en medida de lo posible, los valores radiométricos de la imagen inicial y se adapte a una referencia elegida.

En este caso, puesto que se ha tomado como referencia una imagen el proceso se llama registro.

Básicamente, los dos motivos principales que inducen a corregir geométricamente una imagen son eliminar los errores o distorsiones que se producen en esta, y adaptar la imagen a un sistema de referencia establecido que permita compararla con otros elementos que se encuentren en la misma proyección.

Las correcciones geométricas hacen referencia a cualquier cambio en la posición que ocupan los píxeles en una imagen. Los cambios pueden explicarse a través de una transformación numérica, cuya expresión puede ser:

$$F1(x,y)=G1(f,c)$$

$$F2(x,y)=G2(f,c)$$

Donde x, y hacen referencia a las coordenadas de la imagen corregida y f y c son las coordenadas de la imagen de entrada.

Las fases a seguir en la corrección geométrica de una imagen son:

- 1- Selección de puntos de control.
2. Cálculo de la transformación.
3. Remuestreo de la imagen.
4. Verificación del proceso.

En este caso, la corrección se ha realizado mediante la proyección de la imagen multiespectral sobre el modelo 3D obtenido por fotogrametría, que posteriormente se ha reproyectado siguiendo un plano ortogonal.



Figura 63: Ejemplo del modelo 3D con textura real de la zona de trabajo 2

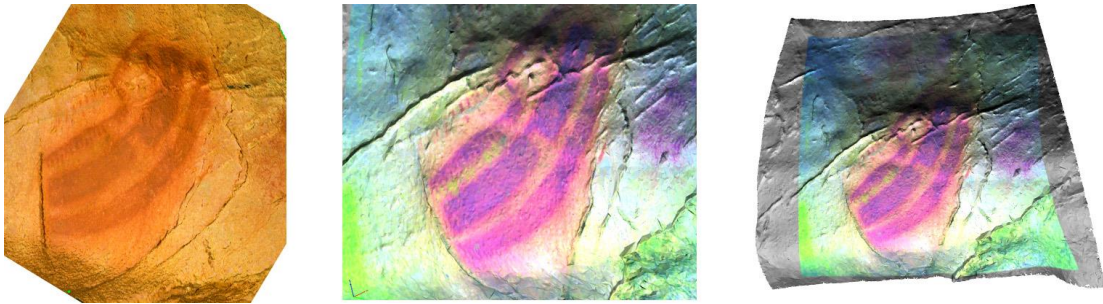


Figura 64: Ejemplo del modelo 3D con textura real y composición en falso color de la zona de trabajo 3

5.3.3. Procesado de los paneles

Se han desarrollado, testeado, comprobado y validado una serie de metodologías informatizadas. Dichas metodologías permiten analizar la señal de la información espectral capturada, para poder extraer conclusiones acerca de las mismas (Bayarri-Cayón, et.al, 2015b). El diagrama de flujo seguido es el siguiente.

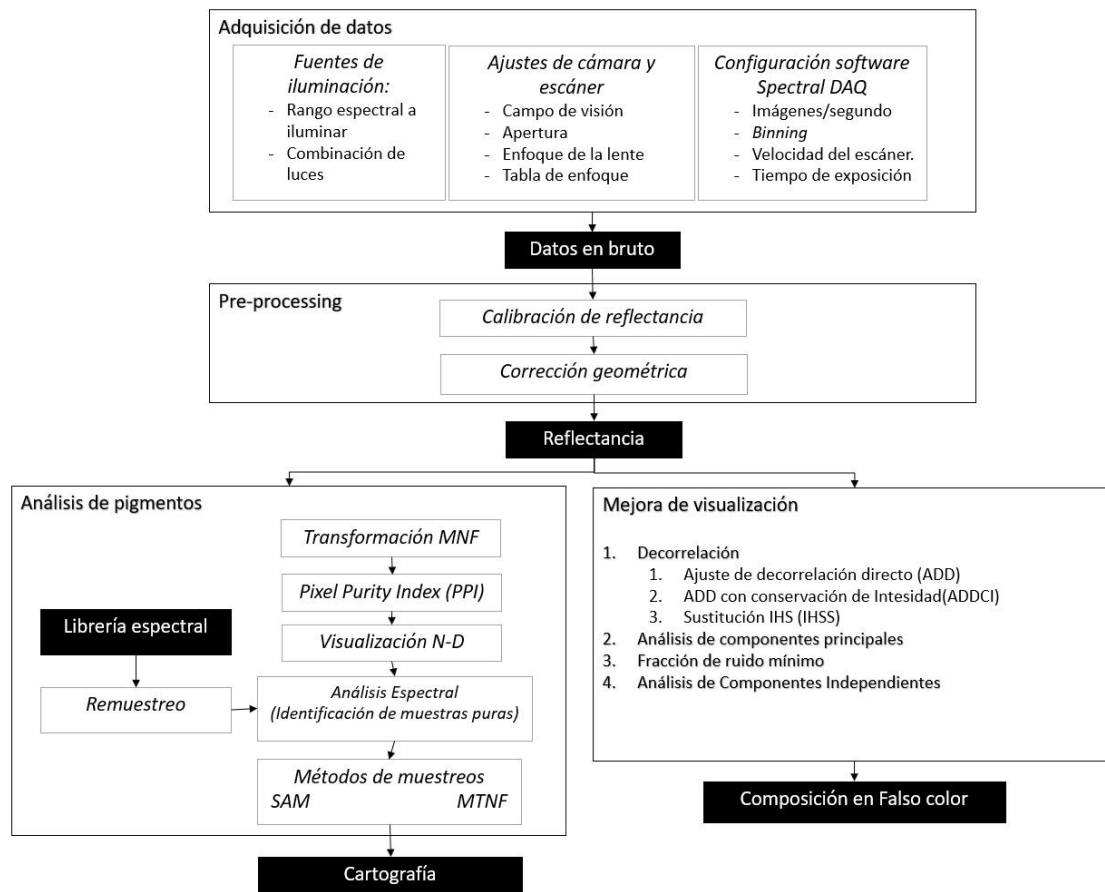


Figura 65: Diagrama de flujo de trabajo utilizado para la realización de este trabajo

A continuación, se muestra el procesado implementado y que ha sido empleado para valorar las posibilidades y eficiencia de diferentes técnicas de análisis de señal multibanda.

Los procesos integrados se clasifican en dos familias.

- Técnicas de análisis: El fin es poder generar cartografía de pigmentos y poder distinguir entre los que son iguales y no.

- Técnicas de mejora de visualización: El fin es poder recuperar pinturas que no se ven a simple vista.

Se han empleados métodos de diferente complejidad. De todos los métodos empleados, los de análisis son los que se han empleado para caracterizar el biodeterioro y los de mejora de visualización para contribuir al estudio del arte rupestre (Bayarri-Cayón, V. 2014).

5.3.3.1. Pixel Purity Index (PPI)

El Pixel Purity Index (PPI) se emplea para encontrar los píxeles más espectralmente puros (extremos) en imágenes multiespectrales e hiperespectrales. Normalmente se corresponden con los miembros finales de mezcla. El PPI se calcula proyectando repetidamente diagramas de dispersión n-D en un vector unitario aleatorio.

Computacionalmente se registran los píxeles extremos en cada proyección (los píxeles que caen sobre los extremos del vector unitario) y anota el número total de veces que cada píxel está marcado como extremo. Se crea una imagen de pureza de píxeles donde cada valor de píxel corresponde al número de veces que el píxel se registró como extremo.

La función PPI puede crear una nueva banda de salida o continuar sus iteraciones y agregar los resultados a una banda de salida existente. El PPI se ejecuta típicamente en un resultado de transformación MNF, excluyendo las bandas de ruido. Los resultados del PPI usualmente se usan como entrada en el Visualizador n-D.

5.3.3.2. visualizador n-D

Se emplea para localizar, identificar y agrupar los píxeles más puros y las respuestas espectrales más extremas en un conjunto de datos. El visualizador n-D ayuda a visualizar la forma de una nube de datos que resulta del trazado de datos de imagen en el espacio espectral (con bandas de imágenes como ejes de trama). El número máximo de bandas a mostrar es 54. Normalmente se utiliza un subconjunto espacial de datos de la fracción mínima de ruido (MNF) que utilizan sólo los píxeles más puros determinados a partir del Índice de Pureza de Píxeles (PPI)

También se emplea para para comprobar la separabilidad de sus clases cuando se generan regiones de interés (ROI) como entrada en las clasificaciones supervisadas.

5.3.3.3. SAM (*Spectral Angle Mapper*)

El mapeador de ángulo espectral (SAM) basado en Rashmi *et al.* (2014) es una clasificación espectral basada en la física que utiliza un ángulo n-D para hacer coincidir los píxeles con los espectros de referencia. El algoritmo determina la similitud espectral entre dos espectros calculando el ángulo entre los espectros y tratándolos como vectores en un espacio con dimensionalidad igual al número de bandas. Esta técnica, cuando se usa con datos de reflectancia calibrados, es relativamente insensible a los efectos de iluminación y albedo. Los espectros de las muestras puras utilizados por SAM pueden provenir de archivos ASCII o bibliotecas espectrales, o puede extraerlos directamente de una imagen (como espectros promedio de regiones de interés, ROI). SAM compara el ángulo entre el vector del espectro del miembro final y cada vector del pixel en el espacio n-D. Los ángulos más pequeños representan coincidencias más cercanas al espectro de referencia. Los píxeles más alejados que el umbral de ángulo máximo especificado en radianes no están clasificados.

La clasificación SAM asume los datos de reflectancia. Sin embargo, si utiliza datos de radiancia, el error generalmente no es significativo porque el origen sigue cerca de cero.

5.3.3.4. Ajuste de decorrelación

Es una técnica para mejorar la separación de color en imágenes con alta correlación entre canales. Si vemos los píxeles de 3 bandas de una imagen como 3 vectores; el objetivo consiste en encontrar la transformación lineal que resulta en la eliminación de la correlación entre los vectores en el espacio transformado. Este es un problema de autovectores, y puede ser considerado como una rotación del sistema de coordenadas del espacio del vector original. Dentro de este espacio girado, cada componente se reajusta (ajuste de contraste) mediante la normalización de las varianzas de los vectores. Es entonces cuando se aplica la rotación que devuelven los vectores para el sistema de coordenadas inicial.

Tanto los pasos de las rotaciones como de normalización varianza se puede describir mediante una matriz y operaciones vectoriales, que se pueden combinar en una sola operación matemática que opera la imagen de entrada y genera como resultado un ajuste de decorrelación.

El efecto del proceso es obtener una imagen de salida cuyos píxeles están bien distribuidos entre todos los colores posibles, preservando al mismo tiempo el sentido relativo de tono, saturación, y la intensidad de la imagen de entrada.

5.3.3.5. Análisis de Componentes Principales (ACP)

Según Schowengert (1997), es una técnica estadística que transforma los datos de las bandas multivariadas de radiancia, que a menudo están altamente correlacionadas (es decir, son visualmente y numéricamente similares).

La transformación de Componentes Principales (TCP) es una transformación del espacio de imagen diseñado para eliminar esta redundancia espectral. Se trata de una transformación lineal del tipo $ND' = W \cdot ND$, con una matriz de imagen específica W_{CP} , $CP = W_{CP} \cdot ND$

Esta transformación altera la matriz de covarianza del siguiente modo:

$$C_{CP} = W_{CP} C W_{CP}^T$$

Y la TCP es óptima en el sentido de que, de todas las posibles transformaciones, elegimos la W_{CP} particular que diagonaliza la matriz de covarianza de la imagen multispectral original.

Se han empleado dos algoritmos de CP diferentes, uno que ha sido adaptado de Richards (1999) y la transformación de Karhunen-Loeve, que se han programado en lenguaje IDL (*Interactive Data Language*). Ambos métodos se han llevado a cabo empleando las matrices de correlación y todas las bandas fueron incluidas en la transformación.

5.3.3.6. Transformación de Fracción de Mínimo Ruido (MNF)

La transformación MNF se emplea para determinar la dimensionalidad inherente de datos de imagen, para separar el ruido en los datos y para reducir los requisitos de cálculo para el procesamiento posterior (Boardman y Kruse, 1994). Tanto los valores característicos resultantes y las imágenes MNF (autoimágenes) se utilizan para evaluar la dimensionalidad de los datos.

La transformación MNF modificada de Green *et al.* (1988), es una transformación lineal que consta de las siguientes rotaciones de análisis de componentes principales separados:

- La primera rotación utiliza los componentes principales de la matriz de covarianza de ruido para decorrelacionar y reescalar el ruido en los datos (un proceso conocido como blanqueamiento de ruido); dando como resultado datos transformados en el que el ruido tiene varianza unitaria y no hay correlación banda a banda.
- La segunda rotación emplea los componentes principales derivados de los datos de la imagen original después de haber sido blanqueado el ruido de la primera rotación y reescalado por la desviación típica del ruido. Puesto que posteriormente habrá más

procesamiento espectral, la dimensionalidad inherente de los datos se determinará mediante el examen de los autovalores finales y las imágenes asociadas. Se puede dividir el espacio de datos en dos partes: una parte asociada con grandes valores y autoimágenes coherentes, y una parte complementaria con autovalores próximos a la unidad e imágenes dominadas por el ruido. Empleando únicamente las porciones coherentes se separa el ruido de los datos, mejorando de este modo los resultados de los procesamientos espectrales.

La transformación MNF también se puede utilizar para eliminar el ruido de los datos mediante la realización de una transformada directa, determinando qué bandas contienen las imágenes coherentes (examinando las imágenes y los autovalores), y posteriormente ejecutar una transformada inversa empleando un subconjunto espectral que incluya únicamente las bandas buenas, o suavizar las bandas con mayor ruido antes de ejecutar la inversa.

5.3.3.7. Análisis de Componentes Independientes (ICA)

El Análisis de Componentes Independientes (ACI) se puede utilizar en conjuntos de datos multiespectrales o hiperespectrales para transformar un conjunto de señales mezcladas al azar, en componentes que son mutuamente independientes.

La transformación IC se emplea como una herramienta para la separación ciega de fuentes, donde no se dispone de información previa sobre la mezcla. La transformación se basa en el supuesto de que la fuente independiente no es gaussiana, y emplea estadística de orden superior para revelar características interesantes en los típicos conjuntos de datos hiperespectrales no gaussianos. La transformación IC puede distinguir características de interés incluso cuando ocupan sólo una pequeña parte de los píxeles en la imagen.

Los ACI se utilizan en teledetección para la reducción de dimensión, extracción de características de la imagen, detección de anomalías y elementos, separación de elementos, clasificación, extracción de componentes puros, reducción de ruido, y cartografiado.

En comparación con el análisis de componentes principales, análisis de CI ofrece algunas ventajas únicas:

- Los análisis de CP son una descomposición ortogonal. Se basa en el análisis de la matriz de covarianza, que se basa en una suposición de distribución gaussiana. El análisis de IC se basa en el supuesto de distribución no gaussiana de las fuentes independientes.

- El análisis de CP emplea sólo estadísticas de segundo orden, mientras que el análisis de CI utiliza estadísticas de orden superior. La estadística de orden superior es una suposición estadística más sólida, revelando características interesantes en los conjuntos de datos hiperspectrales generalmente no gaussianos.

Si la característica de interés (tales como una anomalía) sólo ocupa una pequeña parte de todos los píxeles, que hace que la contribución sea insignificante a la matriz de covarianza de la imagen completa; en el análisis de CP, la característica de interés será considerada como las bandas ruidosas. En el análisis de IC, las características se distinguen de las bandas ruidosas.

Capítulo 6: Resultados

6.1. Campaña de espectroradiómetro.

Las firmas de reflectancia espectral suelen ayudar a determinar si dos tipos de pigmentos pueden distinguirse entre sí y, en dicho caso, en qué parte del espectro difieren las características espectrales.

El espectroradiómetro es necesario a la hora de diferenciar espectralmente diferentes tipos de pigmentos y es una herramienta con gran potencial en la determinación de composiciones químicas y por consiguiente en el origen de los pigmentos existentes.



Figura 66: Espectroradiómetro en disposición de tomar lectura.

El muestreo se realizó utilizando el espectroradiómetro de resolución completa de Analytical Spectral Devices. Este espectroradiómetro puede obtener datos en el rango de 350-2500 nm (Figura 67), pero es importante señalar que el sistema de imágenes hiperespectrales sólo aprovechará los datos entre 400 y 1000 nm. Se obtuvieron las firmas espectrales de los pigmentos, y fue especialmente importante caracterizar los lugares donde el análisis espectral detectó los miembros finales o muestras puras de pigmento ocre para entrenar el proceso posterior de los métodos de cartografía (Bayarri, *et al.*, 2016).

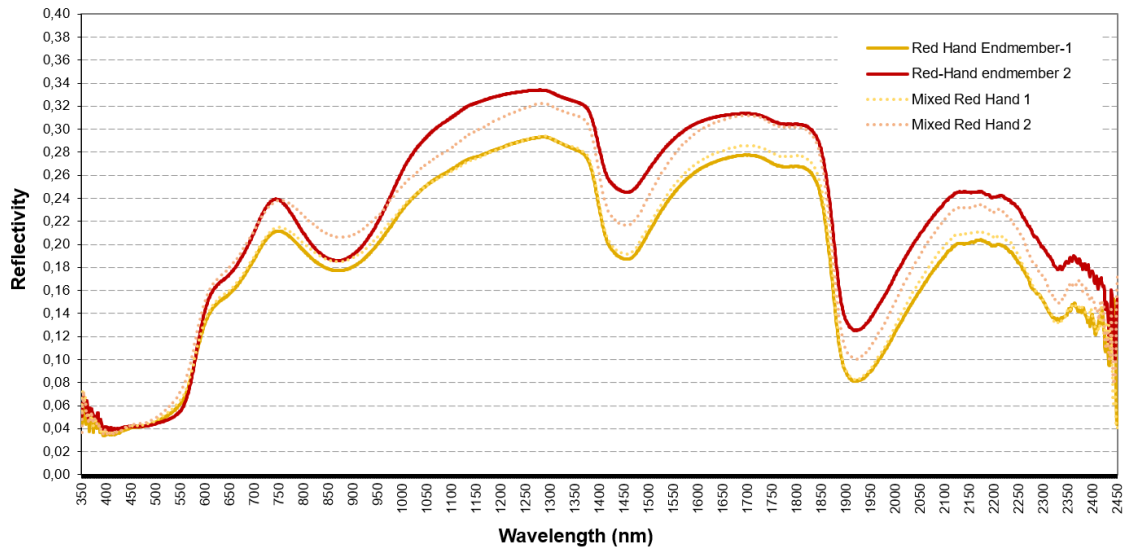


Figura 67: Firmas espectrales de pigmento ocre en las manos.

Con los datos, es posible diferenciar entre diferentes tipos de pigmentos que a los ojos de un observador serían casi indistinguibles. Esto es posible porque la firma espectral, en lugar de utilizar información del espectro visible, integra partes de los espectros ultravioleta e infrarrojo, en los que la diferente composición ofrece diferentes señales. Los datos de la firma espectral se utilizan para analizar la separabilidad entre clases, es decir, para saber cuántos tipos de pigmentos pueden distinguirse y luego integrarse en el procesamiento de las nubes.

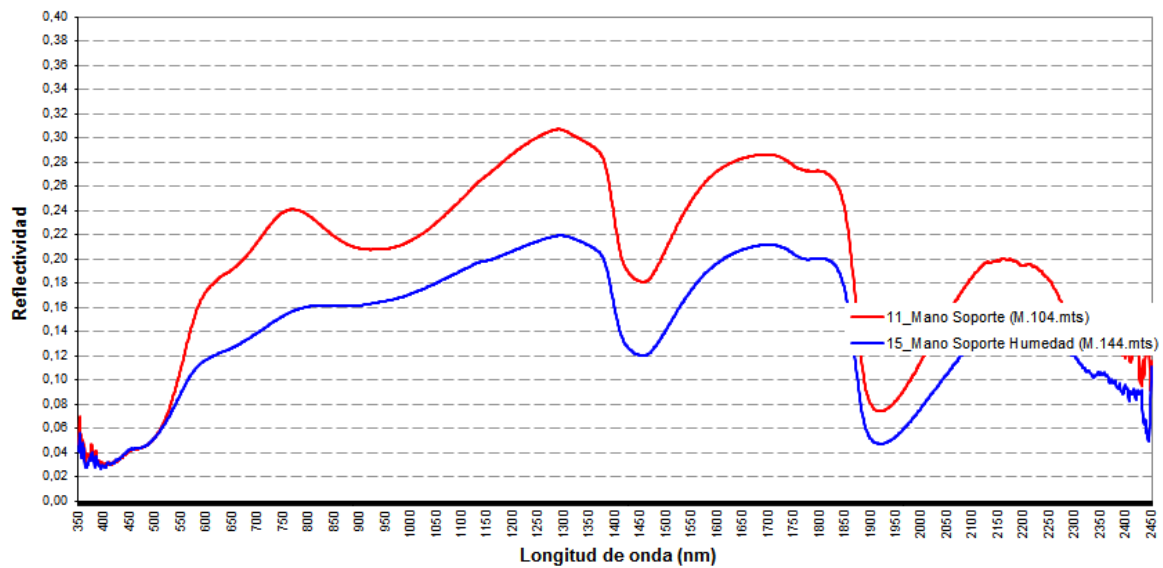


Figura 9: Efecto de la humedad. Cuanto mayor es el grado de humedad presente en el paramento menor es la reflectividad observada en el mismo.

Conclusiones:

Con los datos, se puede afirmar que es posible diferenciar entre diferentes tipos de pigmentos, que a la vista de un observador serían indistinguibles. Esto es posible gracias a que la firma espectral (y los procesos de teledetección multiespectral, hiperespectral, ultraspectral...), en vez de emplear la información del visible, integran parte del espectro ultravioleta e infrarrojo, donde su diferente composición ofrece señales diferentes.

Los datos de las firmas espectrales se emplean para analizar la separabilidad entre clases, es decir, saber cuántos tipos de pigmento es posible distinguir y posteriormente se integran en el procesado de las nubes.

6.2. Resultados del análisis espectral relativos al arte

A continuación, se muestra una serie de pruebas que se han podido llevar a cabo en diferentes localizaciones que se han comparado con lo publicado hasta el momento del presente estudio.


El objetivo de la presente tesis es contribuir, mediante los algoritmos anteriormente descritos, a algunos de los siguientes objetivos:

- a) el reconocimiento de la materia colorante;
- b) el reconocimiento formal de las figuras;
- c) el reconocimiento del proceso técnico;
- d) reconocimiento de superposición de formas;
- e) la documentación del estado de conservación; y

Se han planteado una serie de zonas de trabajo en diferentes cuevas con pinturas o agrupaciones de estas en el que existían uno o varios de los citados problemas con el objeto de contrastar las metodologías planteadas.

6.2.1. Zona de Trabajo -1

6.2.1.1. Descripción

Zona de Trabajo -1: 174	
Localización	
Cueva de El Castillo: Panel de las manos, en la pared izquierda.	
Descripción del motivo	
Cabeza de cierva con el interior estriado y trazo lineal rojo.	
Caracterización del soporte	
Motivo realizado sobre caliza. El soporte se encuentra seco.	
Caracterización técnica	
La cierva ha sido trazada mediante grabado múltiple y la pintura roja mediante aplicación probablemente tipo pincel.	
Estado de conservación	
Sin observaciones	
	Imagen

6.2.1.2. Técnicas empleadas:

Decorrelación de imagen:

- Se han extraído las bandas decorreladas
- Se han generado composiciones en falso color a partir de las bandas decorreladas.

Análisis de Componentes Principales:

- - Se han extraído las bandas transformadas
- - Se han generado composiciones con las bandas transformadas.

Transformadas MNF:

- - Se han extraído las bandas transformadas

- - Se han generado composiciones con las bandas transformadas.

Transformadas ICA:

- - Se han extraído las bandas transformadas
- - Se han generado composiciones con las bandas transformadas.

6.2.1.3. Descripción de las mejoras

1. Reconstrucción con plena nitidez de la delineación de los trazos grabados y en consecuencia del grabado.

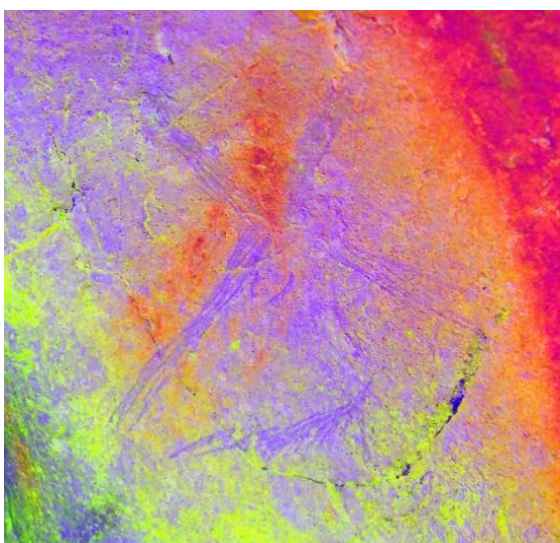


Figura 68: Composición en falso color con la reconstrucción de los trazos grabados y pigmento en la zona de trabajo 1.

2. Estudio del proceso de ejecución: en las imágenes se observa las superposiciones entre figuras, lo que permite reconstruir la estratigrafía y el proceso de adición de motivos. En el detalle posterior se observa cómo el grabado es posterior a la pintura pues la corta.

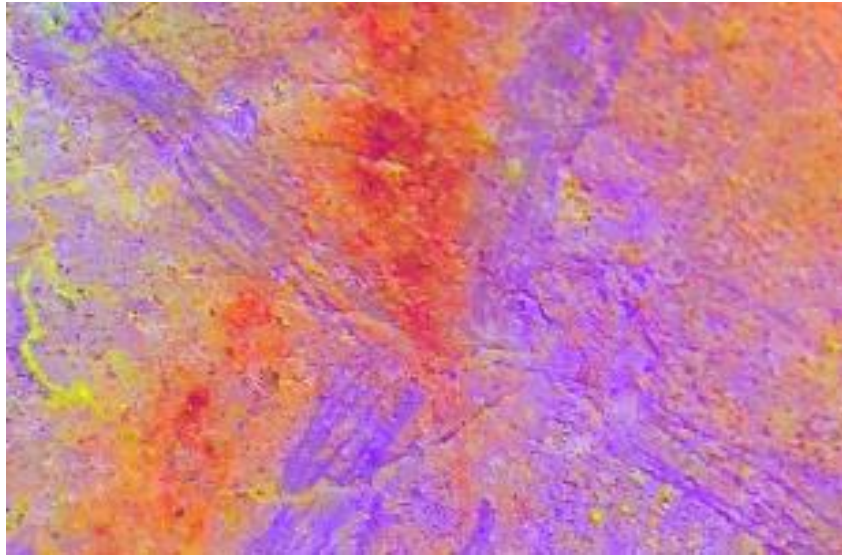


Figura 69: Composición en falso color con detalle de grabado y pigmento en el que se aprecia el proceso de ejecución en la zona de trabajo 1

3. Reconstrucción del proceso técnico: la lectura de la imagen permite estudiar en detalle la trazabilidad de las líneas que componen la figura, permitiendo acercarse a la reconstrucción analítica de la superposición de trazos dentro de una misma línea.

6.2.1.4. Comparación con lo conocido:

A continuación, se muestra la diferencia entre el calco de Eduardo Ripoll de la década de los 50 y el actual obtenido mediante teledetección.

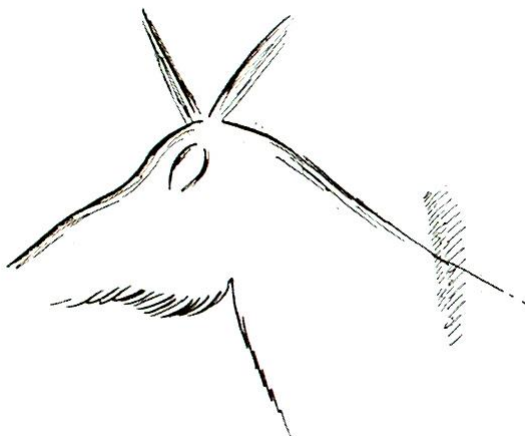
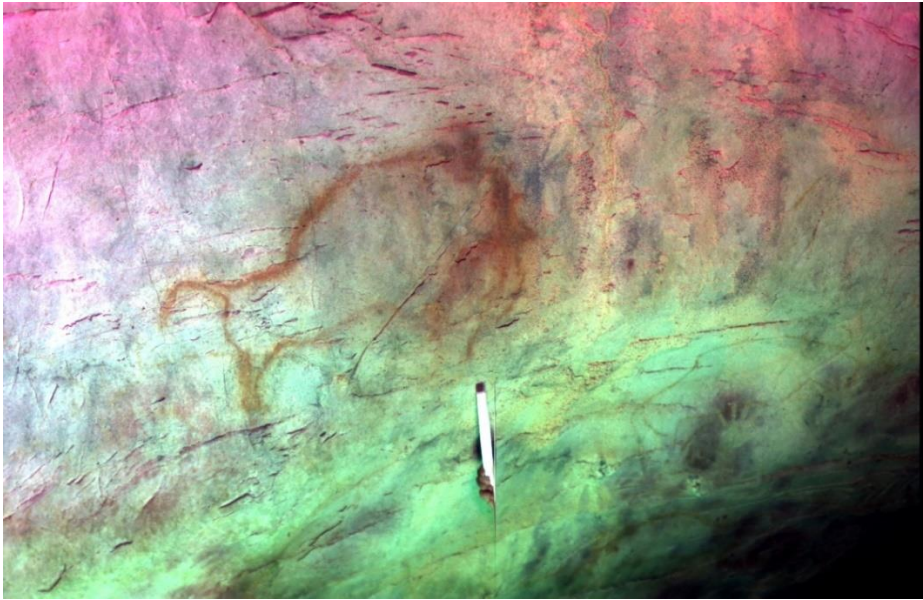


Figura 70: Comparativa entre la información conocida y el resultado del análisis para la zona de trabajo 1

6.2.2. Zona de Trabajo -2

6.2.2.1. Descripción

Zona de Trabajo -2
Localización
Cueva del Castillo: Panel de las manos, en el techo, a mano izquierda.
Descripción del motivo
Figura de bisonte compuesto por la totalidad de las líneas de contorno exterior (con referencia al sexo), asociándose a la región de la cara (en su parte baja) dos líneas sinuosas de diferente recorrido.
Caracterización del soporte
Motivo realizado sobre caliza. El soporte se encuentra bastante húmedo (incluso en algún punto puede percibirse una tenue capa de agua) y la parte anterior del animal con recubrimientos de calcita.
Caracterización técnica
Dibujo anaranjado de trazado continuo mediante óxido de hierro.
Estado de conservación
Se asocian al motivo grafitos negros que fueron limpiados.

Imagen

6.2.2.2. Técnicas empleadas

Decorrelación de imagen:

- Se han extraído las bandas decorreladas
- Se han generado composiciones en falso color a partir de las bandas decorreladas.

Análisis de Componentes Principales:

- - Se han extraído las bandas transformadas
- - Se han generado composiciones con las bandas transformadas.

Transformadas MNF:

- - Se han extraído las bandas transformadas
- - Se han generado composiciones con las bandas transformadas.

Transformadas ICA:

- - Se han extraído las bandas transformadas
- - Se han generado composiciones con las bandas transformadas.

Se ha creado un mapa de cartografía de pigmentos basado en el análisis hiperespectral.

6.2.2.3. Descripción de las mejoras

1. Reconstrucción de los procesos de limpieza de superposición, observándose grafitis que habían sido eliminados previamente con el fin de que los visitantes tuvieran una percepción más real de las imágenes prehistóricas. Del mismo modo esta información permite documentar aquellas superficies de las imágenes paleolíticas que han sido afectadas por la limpieza.

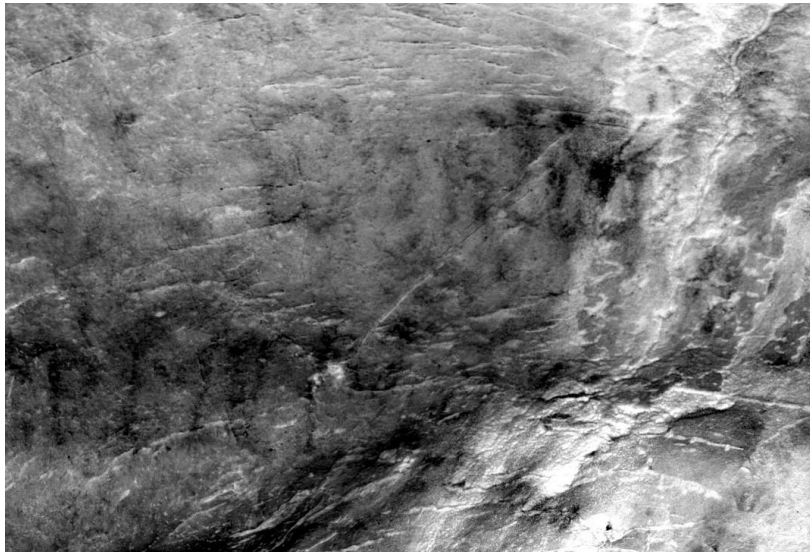


Figura 71: Reconstrucción de los procesos de limpieza de grafitis en zona de trabajo 2

2. Diferenciación espectral de acuerdo a las diferentes composiciones mineralógicas de las materias colorantes; posiblemente asociado a un repinte.

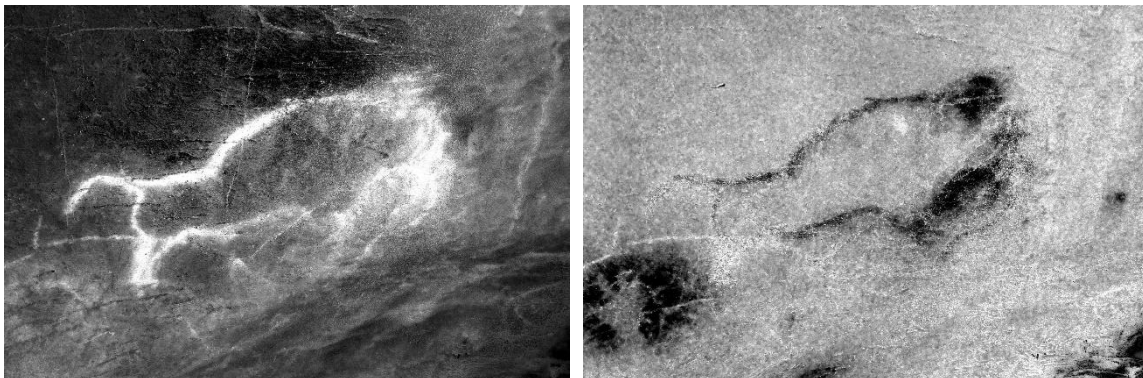
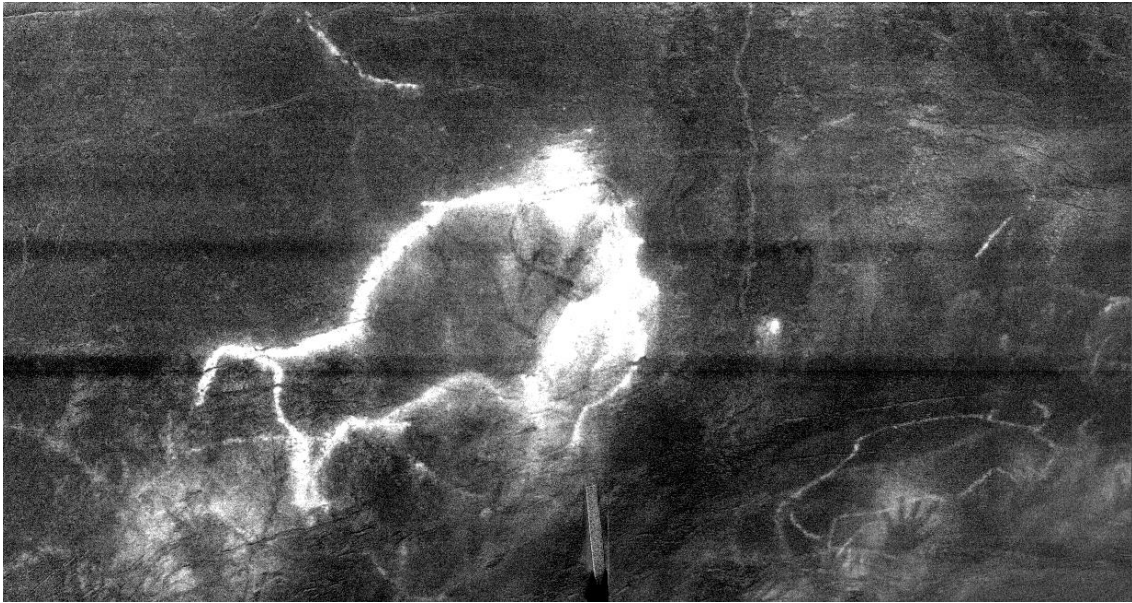
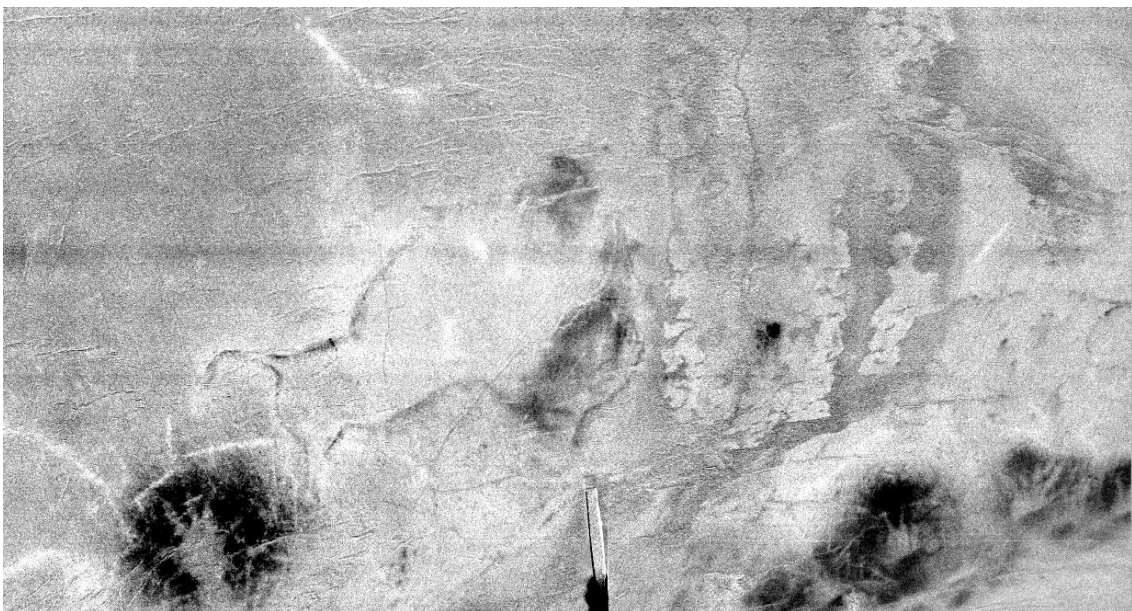


Figura 72: Resultado del análisis de separabilidad de ocre y diferenciación de ellos en la zona de trabajo 2

3. Recuperación de los pigmentos: se documenta con nitidez los límites de los contornos de la figura, pudiéndose llevar a cabo una reconstrucción formal de motivo en función del tipo de pigmento.



a)



b)

Figura 73: Recuperación y aislamiento de tipos de pigmento en la zona de trabajo 2. A imagen a) muestra en blanco ocre similares y la imagen b) muestra en negro otro tipo de ocre.

4. Identificación de zonas afectadas por lixiviación y recubrimiento de calcita debido a una menor intensidad de la señal.

6.2.2.4. Comparación con lo conocido:

El presente panel ha sido estudiado varias veces a lo largo de la historia debido a que es uno de los más conocidos del arte rupestre mundial. Se ha optado por poner un detalle del mismo, que consiste en el bisonte central amarillo y se ha elegido la primera publicación que se hizo mismo y su entorno y la última, en el año 2010.

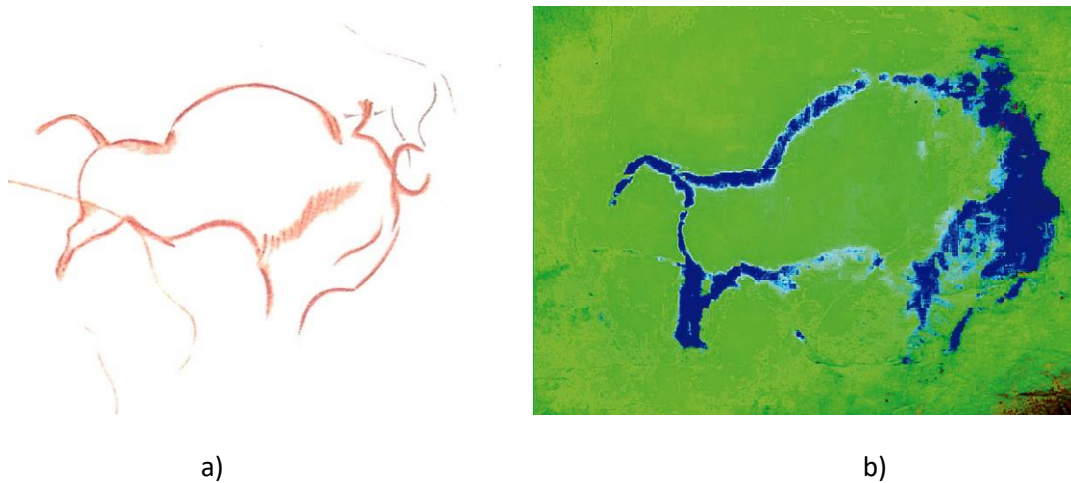


Figura 74: Calco de Alcalde Del Río, *et al.* 1911 (a) y Ruiz-Redondo, 2010 (b)

A continuación, se muestra, el nuevo calco realizado por S. Ripoll para la misma zona. No solo es capaz de separar los pigmentos, sino que además surgen nuevas figuras.



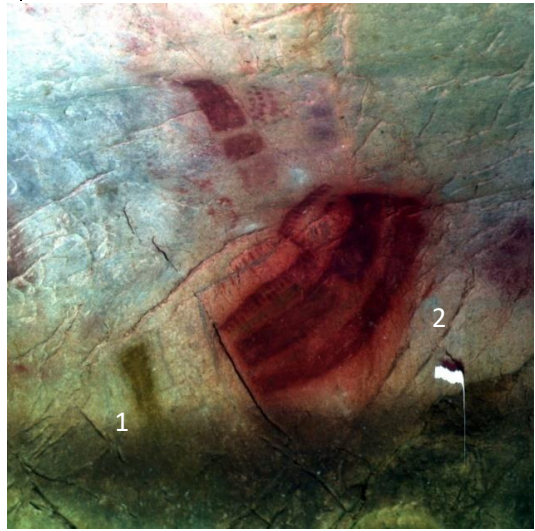
Figura 75: Fragmento del calco actual de la zona por S. Ripoll

Lo que se ha representado tradicionalmente es un bisonte rojo con la parte posterior bien dibujada, pero la anterior imperfecta y confusa. Gracias a las técnicas empleadas, ha sido posible documentar con nitidez los límites de los contornos de la figura y llevar a cabo una reconstrucción formal de la figura. Así mismo se puede hacer una diferenciación espectral de acuerdo a las diferentes composiciones mineralógicas y la identificación de las zonas afectadas por la lixiviación y recubrimiento de calcita debido a una menor intensidad de la señal.

Por debajo del bisonte, se aprecia la silueta de otro orientado hacia la izquierda. Cruzando las extremidades posteriores del bisonte (en amarillo) y superpuesto a la mano se aprecia una silueta de bóvido dispuesta hacia la izquierda y ligeramente rampante. Además de lo citado, aparecen nuevas figuras como una cabeza de caballo en la parte central del bisonte.

6.2.3. Zona de Trabajo -3

6.2.3.1. Descripción

Zona de Trabajo -3	
Localización	
Panel de las manos, en la pared izquierda.	
Descripción del motivo	
Se han incluido dos motivos: 1: Motivo geométrico rectangular. 2: Motivo geométrico y lineal complejo formado por dos estructuras rectangulares ligeramente cóncavas y rematadas en la parte superior por pequeños trazos que se asocian a líneas continuas. Probablemente previo al dibujo del motivo se aplicó una ligera capa de colorante rojo al soporte.	
Caracterización del soporte	
Motivos realizados sobre caliza cubierta por una fina capa de arcilla de descalcificación. Ambos soportes se encuentran húmedos.	
Caracterización técnica	
1: Dibujo amarillo de tinta plana mediante óxido de hierro. El motivo dibujado ha sido contorneado sobrepasando mediante grabado de contorno reiterado exteriormente los contornos del dibujo. 2: Dibujos rojos de tinta plana mediante óxido de hierro. El motivo dibujado ha sido contorneado sobrepasando y superponiendo mediante grabado de contorno reiterado exteriormente a los contornos del dibujo.	
Estado de conservación	Imagen
Sin observaciones.	

6.2.3.2. Técnicas empleadas

Decorrelación de imagen:

- Se han extraído las bandas decorreladas
- Se han generado composiciones en falso color a partir de las bandas decorreladas.

Análisis de Componentes Principales:

- - Se han extraído las bandas transformadas
- - Se han generado composiciones con las bandas transformadas.

Transformadas MNF:

- - Se han extraído las bandas transformadas
- - Se han generado composiciones con las bandas transformadas.

Transformadas ICA:

- - Se han extraído las bandas transformadas
- - Se han generado composiciones con las bandas transformadas.

Mapa de cartografía de pigmentos

6.2.3.3. Descripción de las mejoras

Figura 1:

1. Es posible una reconstrucción del proceso técnico. La lectura de la imagen permite estudiar en detalle la trazabilidad de las líneas que componen la figura, permitiendo acercarse a la reconstrucción analítica de la superposición de trazos dentro de una misma línea.

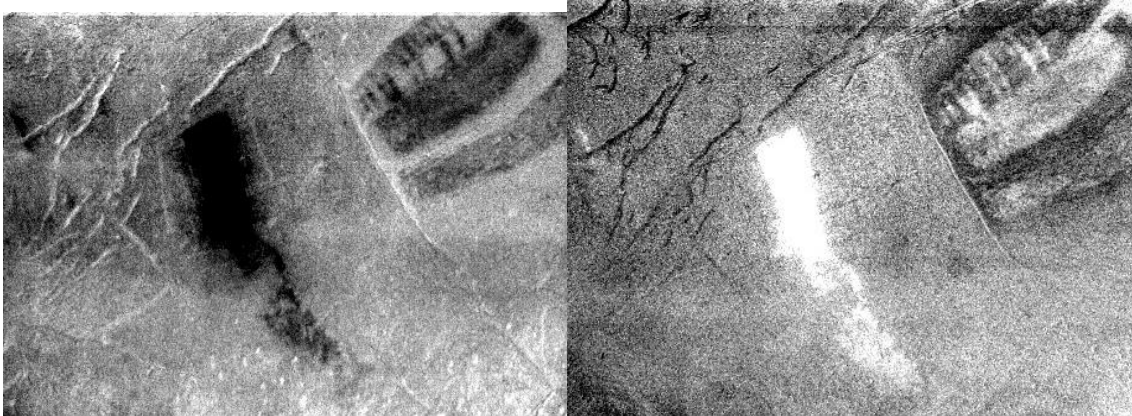


Figura 76: Reconstrucción del proceso técnico en la zona de trabajo 3

2. Reconstrucción con plena nitidez de la delineación de los trazos grabados y en consecuencia del grabado.

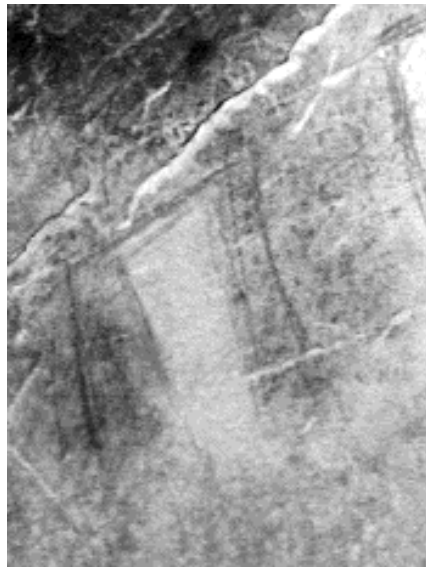


Figura 77: Delineación de los trazos grabados sobre pigmento en la zona de trabajo 3

3. Recuperación de los pigmentos: se documenta con nitidez los límites de los contornos de la figura, pudiéndose llevar a cabo una reconstrucción formal de motivo.
4. Estudio del proceso de ejecución: se observa las superposiciones entre figuras, lo que permite reconstruir la estratigrafía y el proceso de adición de motivos.

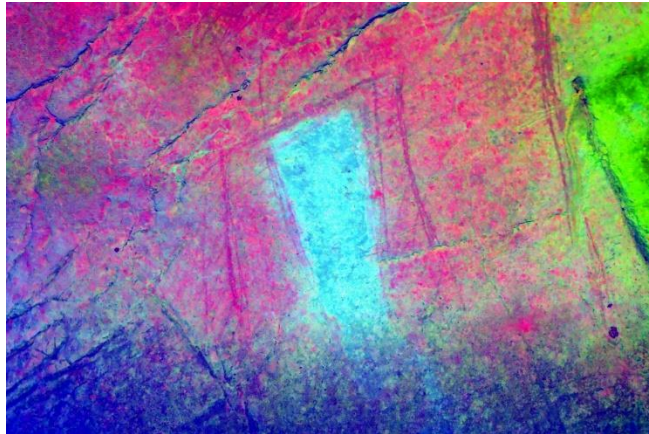


Figura 78: Composición en falso color del motivo con pigmento y grabado superpuesto.

Figura 2:

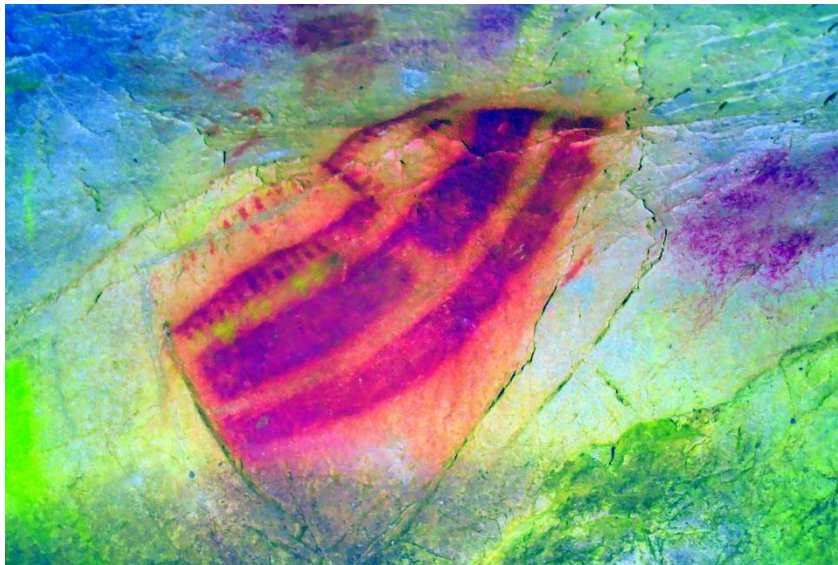


Figura 79: Composición en falso color de la figura 2 de la en la zona de trabajo 3

5. Reconstrucción del proceso técnico: la lectura de la imagen permite identificar la posible existencia de una capa de “enlucido” previa al trazado de las formas rectangulares, lo que permite acercarse a los procesos gráficos

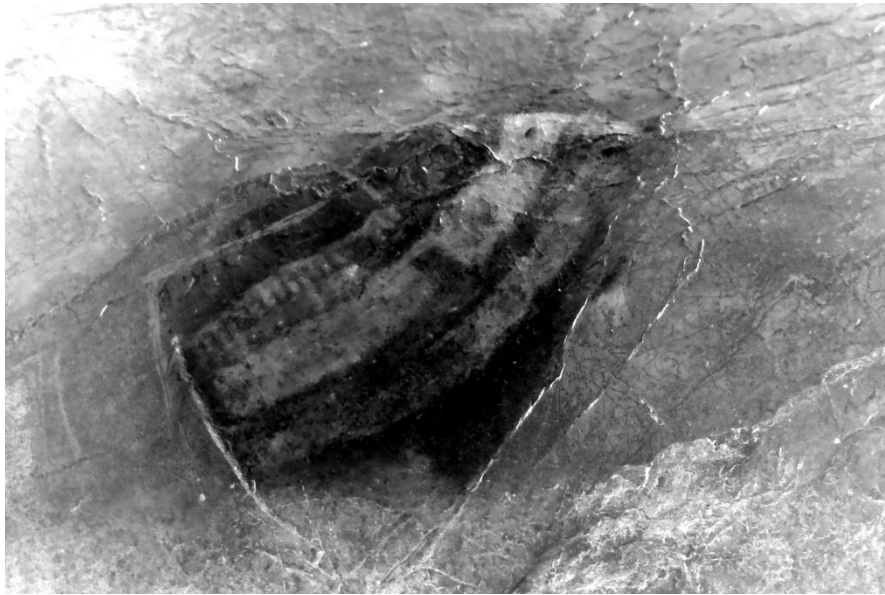


Figura 80: Información de la capa de “enlucido” para la reconstrucción del proceso técnico

6. Reconstrucción con plena nitidez de la delineación de los trazos grabados y en consecuencia del grabado.
7. Estudio del proceso de ejecución: en ambas imágenes se observa las superposiciones entre figuras, lo que permite reconstruir la estratigrafía y el proceso de adición de motivos.



Figura 81: Reconstrucción de los límites de los contornos de la figura.

8. Identificación formal precisa: se documenta con nitidez los límites de los contornos de la figura, pudiéndose llevar a cabo una reconstrucción formal de motivo.



Figura 82: Documentación de los límites de los contornos de la figura.

9. Recuperación de los pigmentos: se documenta zonas espectralmente diferentes, que en la imagen 5 se pueden relacionar claramente con materia colorantes de composición mineralógica diferente. Se ha detectado que pigmentos iguales a los empleados en la figura 1 se han empleado para 8 trazos en la figura 2, que son difícilmente no perceptibles a simple vista.

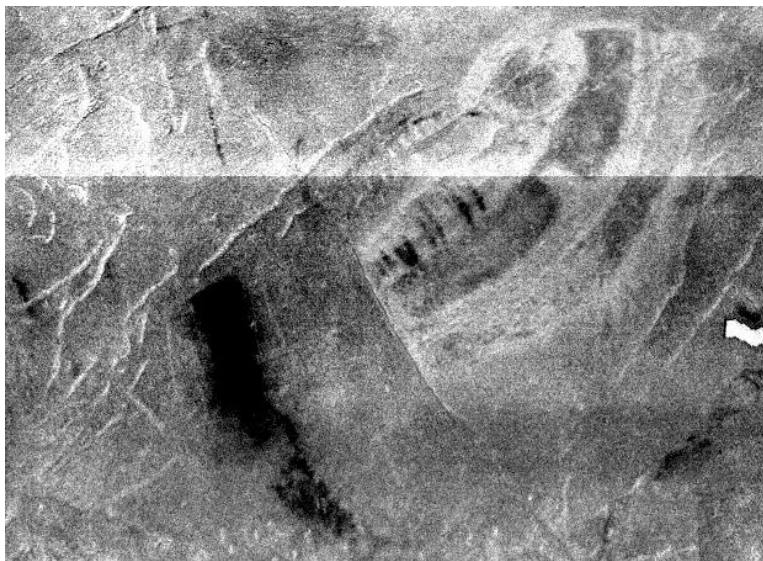


Figura 83: En negro se muestran los pigmentos de la figura 1 empleados en la figura 2 en la zona de trabajo 3

6.2.3.4. Comparación con lo conocido:


A continuación, se muestra el calco realizado por Breuil en (Alcalde Del Río, *et al.* 1911), con el realizado por S. Ripoll en 2016. En el calco se aprecia en amarillo los pigmentos de la figura 1 que se utilizaron para hacer algunos de los trazos de la figura 2. En la figura 1 y parte de la 2 también se aprecia que todo el contorno está grabada con un trazo múltiple muy característico (en negro).



Figura 84: Comparativa entre la información conocida y el resultado del análisis para la zona de trabajo 3

6.2.4. Zona de Trabajo -4

6.2.4.1. Descripción

Zona de Trabajo -4 (213-216)
Localización
Panel de las manos, en la pared izquierda en la zona de acceso a la galería de la izquierda.
Descripción del motivo
Encima del dorso del caballo (3) hay una pequeña figura de cierva de color rojo (1), incompleta y orientada hacia la derecha como dicho caballo, con cuyo dorso coincide. Mide 20 cm. de longitud. También se aprecia un pequeño caballo infrapuesto (2) al équido amarillo más evidente. Tiene un menor tamaño y está orientado hacia la derecha, aunque la parte anterior coincide prácticamente con el infrapuesto. En la parte izquierda hay un tectiforme sencillo en forma de rectángulo ligeramente curvo (4)
Caracterización del soporte
Motivo realizado sobre caliza. El soporte se encuentra con muy bajo grado de humedad y la parte anterior (sobre todo la cabeza) del animal presenta recubrimientos de calcita.
Caracterización técnica
Dibujo amarillo de trazado continuo mediante óxido de hierro.
Estado de conservación
Sin observaciones.

Imagen

6.2.4.2. Técnicas empleadas

Decorrelación de imagen:

- Se han extraído las bandas decorreladas
- Se han generado composiciones en falso color a partir de las bandas decorreladas.

Análisis de Componentes Principales:

- - Se han extraído las bandas transformadas
- - Se han generado composiciones con las bandas transformadas.

Transformadas MNF:

- - Se han extraído las bandas transformadas
- - Se han generado composiciones con las bandas transformadas.

Transformadas ICA:

- - Se han extraído las bandas transformadas
- - Se han generado composiciones con las bandas transformadas.

6.2.4.3. Descripción de las mejoras

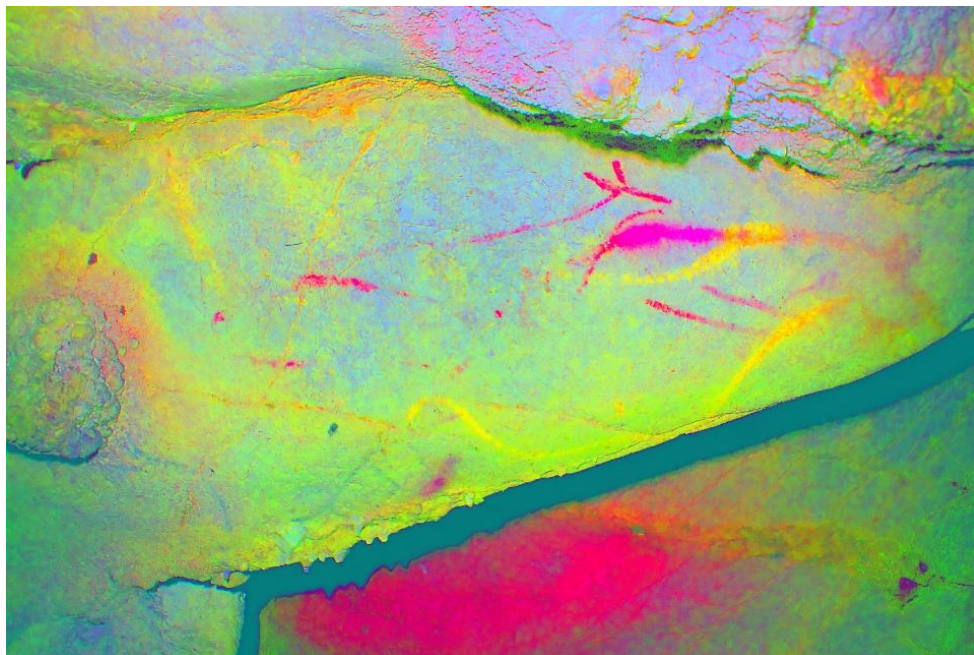
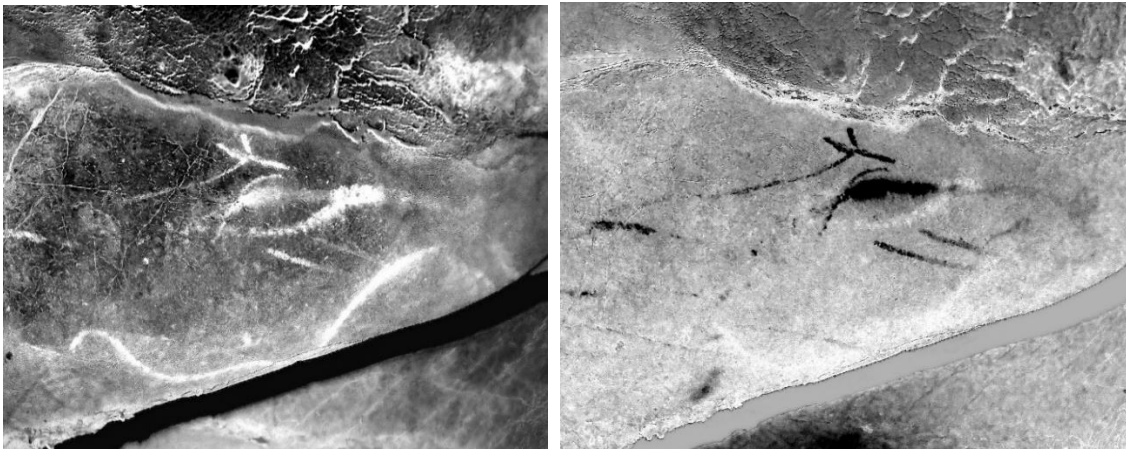


Figura 10: Imagen en falso color de la Zona de trabajo 4

1. Identificación de zonas afectadas por recubrimiento de calcita debido a una menor intensidad de la señal.
2. Recuperación de los pigmentos: se documenta con nitidez los límites de los contornos de la figura, pudiéndose llevar a cabo una reconstrucción formal de motivo.
3. Estudio del proceso de ejecución: en ambas imágenes se observa las superposiciones entre figuras, lo que permite reconstruir la estratigrafía y el proceso de adición de motivos.
4. Reconstrucción del proceso técnico: la lectura de la imagen permite estudiar en detalle la trazabilidad de las líneas que componen la figura, permitiendo acercarse a la reconstrucción analítica de la superposición de trazos dentro de una misma línea y al estudio del medio de aplicación del colorante.



a)

b)

Figura 85: Análisis de separabilidad de ocres de la Zona de trabajo 4. En la imagen a) se observa el caballo superpuesto en blanco, sobre el caballo b) en negro.

5. Discriminación de los pigmentos: se documenta zonas espectralmente diferentes, que se pueden relacionar claramente con materias colorantes de composición mineralógica diferente.

6.2.4.4. Comparación con lo conocido:

H. Breuil en (Alcalde Del Río, *et al.* 1911) publicó lo siguiente:

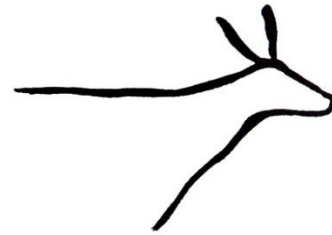


Fig. 116. — Silhouettes linéaires tres archaïques :
3. Petite Biche, n° 25.

Figura 86: Calco H. Breuil de la figura nº 1 de la zona de trabajo 4

Y Garate-Maidagán (2006) publicó lo siguiente:

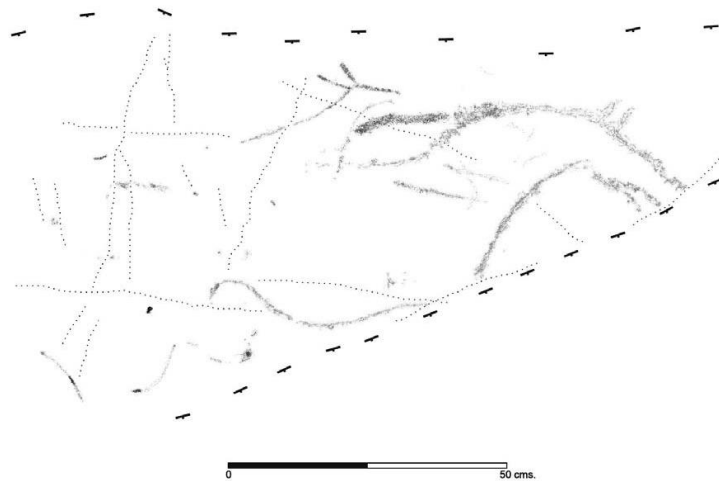


Figura 87: Calco de Garate (2006)

El nuevo calco realizado completa en gran medida las figuras y muestra todo lo comentado con anterioridad.



Figura 88: Resultado del análisis de la Zona de trabajo 4

Figura 1: Encima del dorso del caballo hay una pequeña figura de cierva de color rojo, incompleta y orientada hacia la derecha como dicho caballo, con cuyo dorso coincide. Mide 20 cm. de longitud.

Figura 2: Pequeño caballo superpuesto al équido amarillo más evidente. Tiene un menor tamaño y está orientado hacia la derecha, aunque la parte anterior coincide prácticamente con el infrapuesto. Gracias al análisis hiperespectral se ha conseguido identificar esta nueva figura que no se ve directamente por la existencia de un velo calcítico. La recuperación de los pigmentos permite documentar con nitidez los contornos de la representación. Con esta metodología podemos observar las superposiciones y reconstruir la estratigrafía iconográfica y el proceso de adicción de los motivos. La reconstrucción del proceso técnico nos permite estudiar con detalle la trazabilidad de las líneas que componen la figura, permitiéndonos acercarnos a la reconstrucción analítica. También podemos discriminar los distintos pigmentos que se documentan en zonas espectralmente diferentes, que se pueden relacionar claramente con materias colorantes de composición mineralógica diferente.

Figura 3: En el mismo colgante que las figuras anteriores se halla la figura de otro caballo de color ocre, dispuesto hacia la derecha con un gran vientre y sin patas. Tiene las orejas enhiestas. Mide 64 cm de longitud y está por encima del tectiforme. A la izquierda, hay un trazo rojo y otros negros muy desvanecidos.

Figura 4: En zona de la grupa del caballo ha aparecido un tectiforme sencillo en forma de rectángulo ligeramente curvo. Mide aproximadamente 40 cm de longitud con una anchura de 25 cm.




Figura 89: Superposición del calco sobre la ortoimagen del panel en la zona de trabajo

4

6.2.5. Zona de Trabajo -5

6.2.5.1. Descripción

El panel de las manos de la cueva de El Castillo es posiblemente uno de los más complejos entre el arte paleolítico en general. El uso de diferentes técnicas y colorantes nos permite establecer diferencias entre grupos y nos ayuda a entender la evolución cronoestilística basada en las superposiciones de figuras. El marco cronológico de las figuras se ha establecido entre 41.400 y 10.000 años antes del presente (BP) gracias a la datación con uranio-torio y radiocarbono, aunque nos hemos centrado en las superposiciones de las fases gravetiense-auriñaciense. Los paneles fueron estudiados por primera vez por (Alcalde del Río et al. 1911), pero durante el último siglo muchos investigadores han vuelto a visitar el yacimiento y han aplicado diferentes técnicas para estudiar los paneles de arte rupestre de la cueva, como el dibujo a mano, el trazado directo, el frotamiento o el trazado de *frottage*; la fabricación de moldes directamente a partir de los paneles; la fotografía analógica; las imágenes digitales; y las técnicas para mejorar la visualización, como la decorrelación de elementos individuales (Ripoll Perelló, 1956; García-Guinea y González Echegaray, 1966; Echegaray y romanillo,, 1970, Romanillo y Sainz, 2000; Garate, 2006 y Ruiz Redondo, 2010).

Zona de Trabajo -5
Localización
Panel de las manos.
Descripción de los motivos
Uno de los paneles más complejos de la cueva y posiblemente del arte paleolítico en general. Las distintas técnicas empleadas para la ejecución de las diferentes figuras, así como los diversos colorantes empleados, permiten establecer unas claras diferencias entre cada grupo de figuraciones y a la vez intentar configurar una evolución cronoestilística basada en la estratigrafía de las superposiciones.
Caracterización del soporte
Motivos realizados sobre caliza.
Caracterización técnica
Múltiples técnicas de tinta plana con diferentes pigmentos y grabados.
Estado de conservación
Bastante deficiente con restos de motivos negros que fueron limpiados.

Imagen

6.2.5.2. Técnicas empleadas

Decorrelación de imagen:

- Se han extraído las bandas decorreladas
- Se han generado composiciones en falso color a partir de las bandas decorreladas.

Análisis de Componentes Principales:

- - Se han extraído las bandas transformadas
- - Se han generado composiciones con las bandas transformadas.

Transformadas MNF:

- - Se han extraído las bandas transformadas
- - Se han generado composiciones con las bandas transformadas.

Transformadas ICA:

- - Se han extraído las bandas transformadas
- - Se han generado composiciones con las bandas transformadas.

6.2.5.3. Descripción de las mejoras

Como se mostrará, la teledetección hiperespectral puede ayudar no sólo a identificar mejor las figuras, sino también a aislarlas por el tipo de pigmento y analizar las superposiciones.

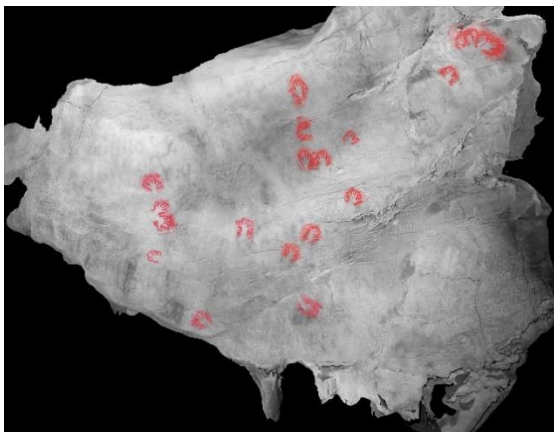
En el primer estudio realizado en el panel de las manos (Alcalde del Río, 1911), se identificaron 9 animales pintados en amarillo, 33 manos en negativo, 13 signos pintados y algunos grupos de puntuación roja, y 6 figuras grabadas, principalmente ciervos. En el proyecto internacional Handpas, se realizó un estudio basado en imagen convencional RGB y técnicas de decorrelación de imagen para mejorar la visualización; lo que permitió documentar un total de 40 manos en el panel (Handpas, 2018).

Mediante la tecnología hiperespectral, hoy en día se han documentado 35 zoomorfos (23 en amarillo, 2 en rojo, 19 en negro y 1 en blanco), 56 manos (en 2 fases) y 22 signos.

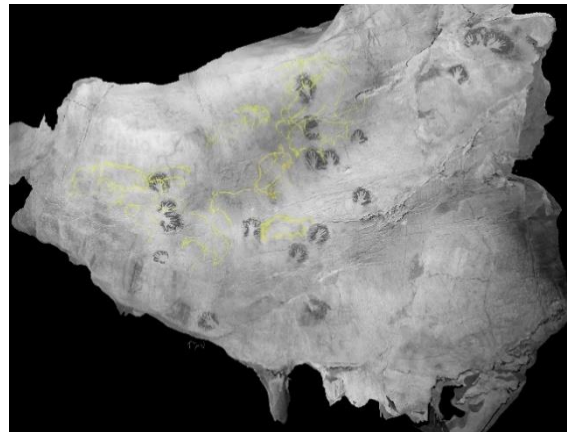
El estudio se realizó en el conjunto del panel; la interpretación arqueológica fue realizada por (Ripoll, *et al.* 2014). Sin embargo, el presente estudio muestra tres áreas de especial interés y el análisis de las manos de todo el panel.

Generalmente, las siluetas de las manos se suelen situar en la base de las estratigrafías pictóricas. Las que tienen fechas absolutas se ubican entre el período gravetiense y el comienzo del período solutrense. Una de las discusiones tradicionales en el panel de las manos es la posición de las manos en la estratigrafía, es decir, qué capas están por encima y por debajo.

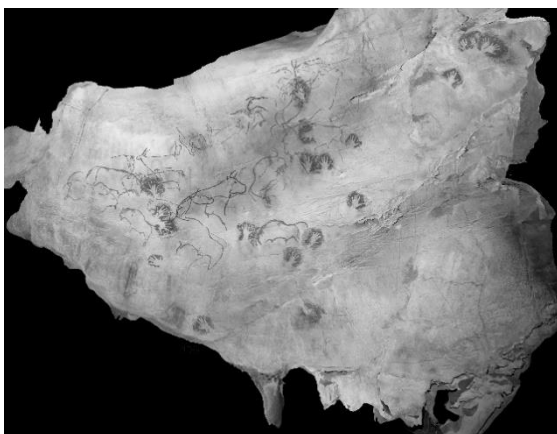
Una gran contribución de la tecnología hiperespectral se utilizó para diferenciar y aislar dos fases de las manos en base a sus firmas espectrales. Una vez aisladas, por superposición se vio que hay tres capas pictóricas entre ellas (Figura 17a-d).



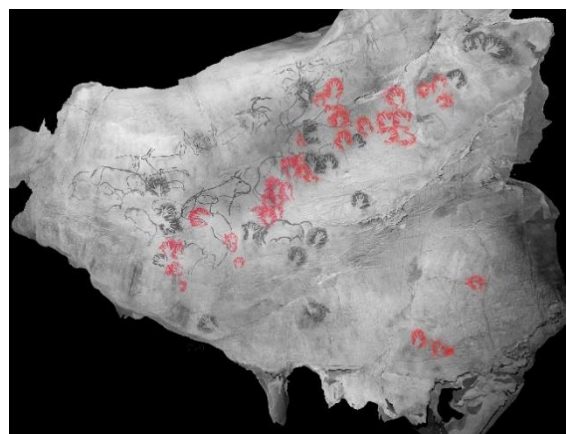
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 90: Imágenes correspondientes a: a) la primera fase de las manos (en rojo); b) la segunda fase, elaborada con pigmento amarillo o siena, muy distinguida y centrada en el conjunto de los uros; c) la tercera fase con representaciones zoomorfas y dos signos cuadrangulares o tectiformes pintados en pigmento amarillo (en negro); y d) la cuarta fase, que corresponde a la segunda fase de las manos.

A continuación, se muestran las dos fases de manos aisladas, en azul se muestran las manos de la 1ª fase y en rojo las de la segunda fase.

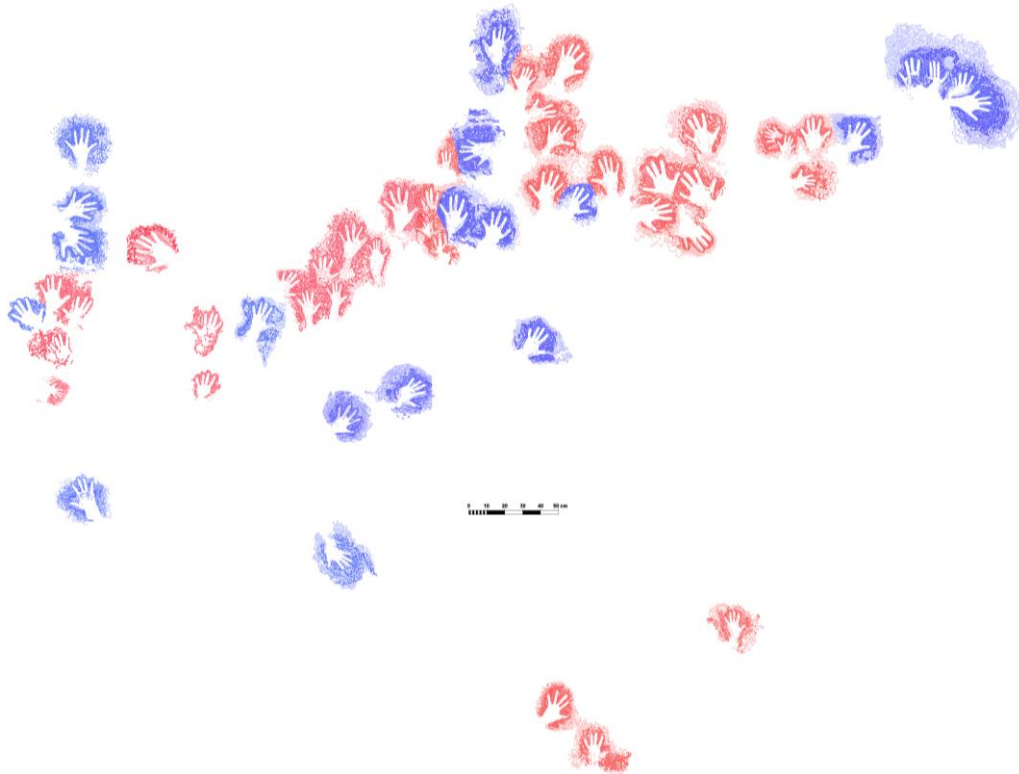


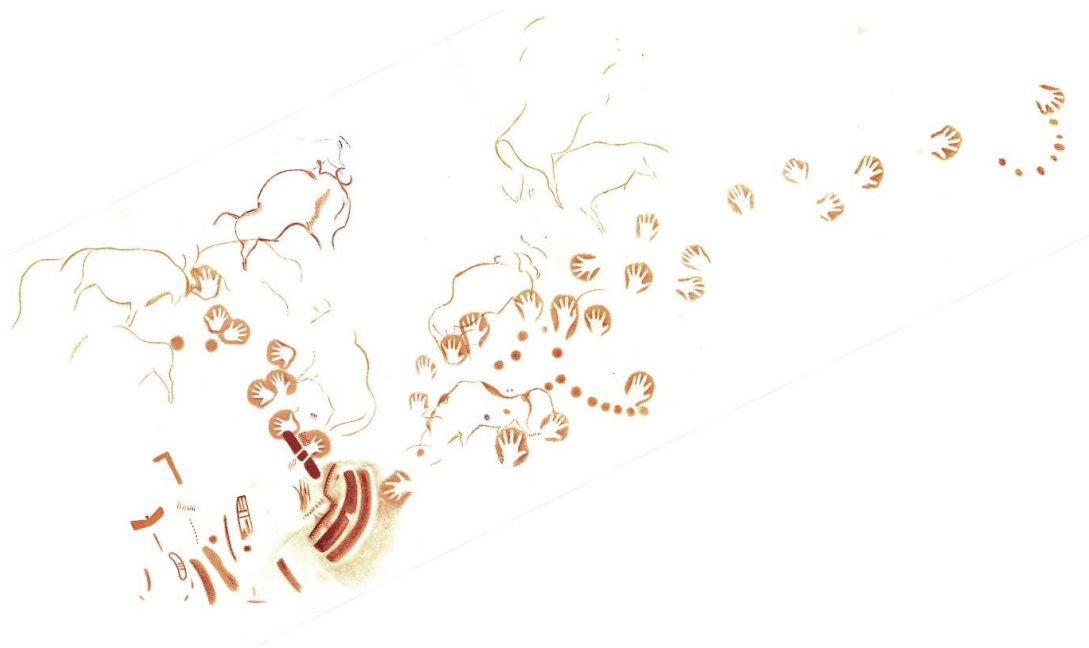
Figura 91: Superposición de las dos fases de manos. En azul se muestran las manos de la 1ª fase y en rojo las de la segunda fase.

6.2.5.4. Comparación con lo conocido:

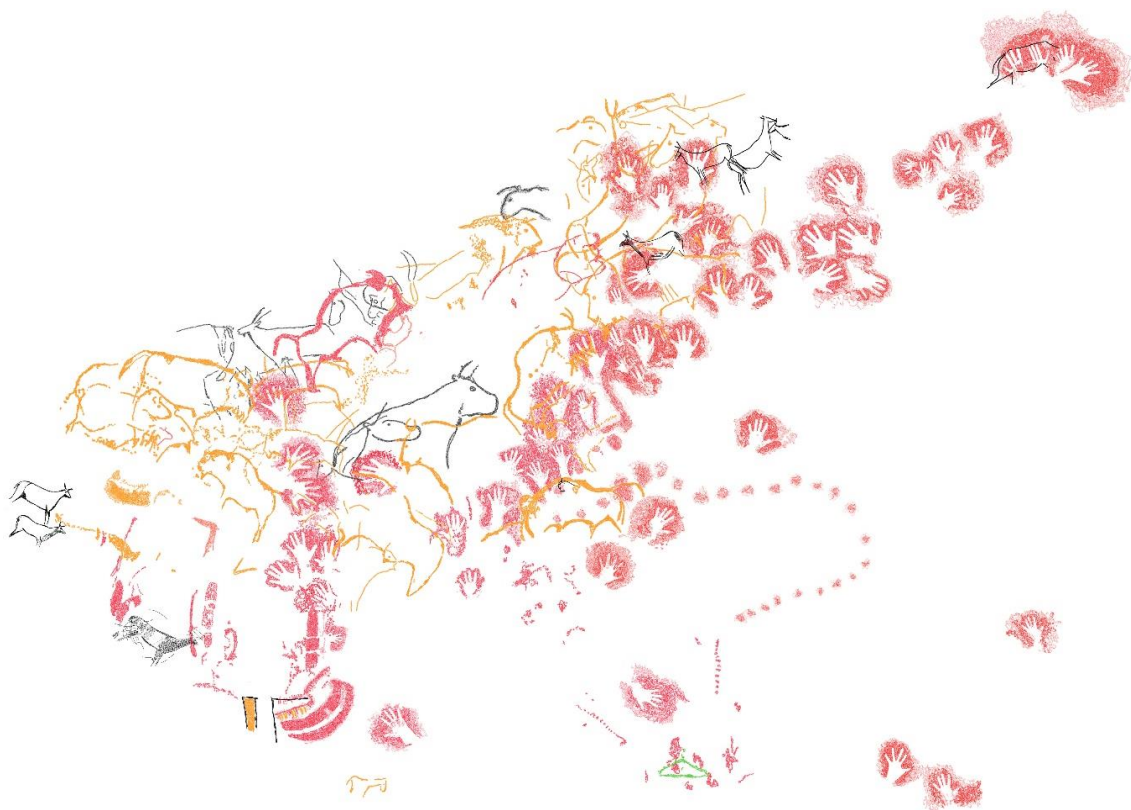
Las zonas de trabajo 1, 2, 3 y 4 forman parte de un elemento mayor conocido como Panel de las manos, en la cueva de El Castillo. La revisión del panel completo (Ripoll-López *et al.* 2014), ofreció los siguientes resultados:

Tabla 8: Resumen de resultados en la revisión del panel de las manos completo

FIGURAS	ALCALDE DEL RÍO, H., BREUIL, H. y SIERRA, L. (1911)	REVISION
MANOS	33	56
BISONTES	9	16+1
UROS		3
CÉRVIDOS		3
CÁPRIDOS		3
IDEOMORFOS	6	11
GRABADOS	7	11
TOTAL	55	97



(a)




(b)

Figura 92: a) Interpretación hecha en 1911 por Alcalde del Río. b) Nueva cartografía de pigmentos obtenida a partir de datos hiperespectrales del panel de las manos.

La integración de técnicas como la fotogrametría y la teledetección ha permitido obtener un 76% más de figuras en todo el panel, principalmente porque presentan problemas como los descritos anteriormente y un 40% más de manos que empleando imagen convencional y técnicas de decorrelación.

6.2.6. Zona de Trabajo -6

6.2.6.1. Descripción

Zona de Trabajo -6 109-113
Localización
Antes del Panel de las manos.
Descripción del motivo
Grupo de bisontes policromos y sus figuras conexas que se encuentran en una especie de suave concavidad de la parte baja del muro. El primero, a la izquierda, en la parte superior, es un típico bisonte altamirense (1), en actitud de saltar hacia la derecha, con las patas recogidas bajo el cuerpo, las pezuñas muy bien indicadas y algunos detalles finamente grabados. También se aprecian unas manos rojas en negativo una en la zona de la cabeza (2) y otra debajo de las patas posteriores (3). En la parte de la giba del bisonte hay dos pequeños dibujos de ciervas con la misma orientación que el mencionado bisonte (4 y 5). A la izquierda hay otra representación de otro bisonte, de estilo diferente, de tamaño mucho menor y muy incompleta (6).
Caracterización del soporte
Motivos realizados sobre caliza.
Caracterización técnica
Dibujo de tinta plana mediante óxido de hierro, pigmento negro y grabado.
Estado de conservación
Bastante deficiente


Imagen

6.2.6.2. Técnicas empleadas

Decorrelación de imagen:

- Se han extraído las bandas decorreladas
- Se han generado composiciones en falso color a partir de las bandas decorreladas.

Análisis de Componentes Principales:

- - Se han extraído las bandas transformadas
- - Se han generado composiciones con las bandas transformadas.

Transformadas MNF:

- - Se han extraído las bandas transformadas
- - Se han generado composiciones con las bandas transformadas.

Transformadas ICA:

- - Se han extraído las bandas transformadas
- - Se han generado composiciones con las bandas transformadas.

Métodos de análisis para la generación de cartografía de pigmentos.

6.2.6.3. Descripción de las mejoras

1. Diferenciación espectral de acuerdo a las diferentes composiciones mineralógicas. Tales como los ocreos o pigmentos negros.
2. Recuperación de los pigmentos: se documenta con nitidez los límites de los contornos de la figura, pudiéndose llevar a cabo una reconstrucción formal de motivo en función del tipo de pigmento.
3. Extracción de pigmentos subyacentes bajo la costra calcítica y el pigmento ocre: en la imagen de la izquierda se observan las patas de una cabra y en la derecha la cabeza de un ciervo. Esto permite reconstruir la estratigrafía y el proceso de adición de motivos.

6.2.6.4. Comparación con lo conocido

Se han empleado los calcos elaborados por H. Breuil sobre el panel y otro de la revisión que realizó E. Ripoll del bisonte inferior derecha.



Figura 93: Calco de H. Breuil en (Alcalde Del Río, *et al.* 1911) del panel y del bisonte en la zona inferior derecha



Figura 94: Calco de E. Ripoll del panel y del bisonte en la zona inferior derecha

En el proyecto Internacional Handpas (Handpas, 2018) aparecen documentadas 8 manos en negativo.

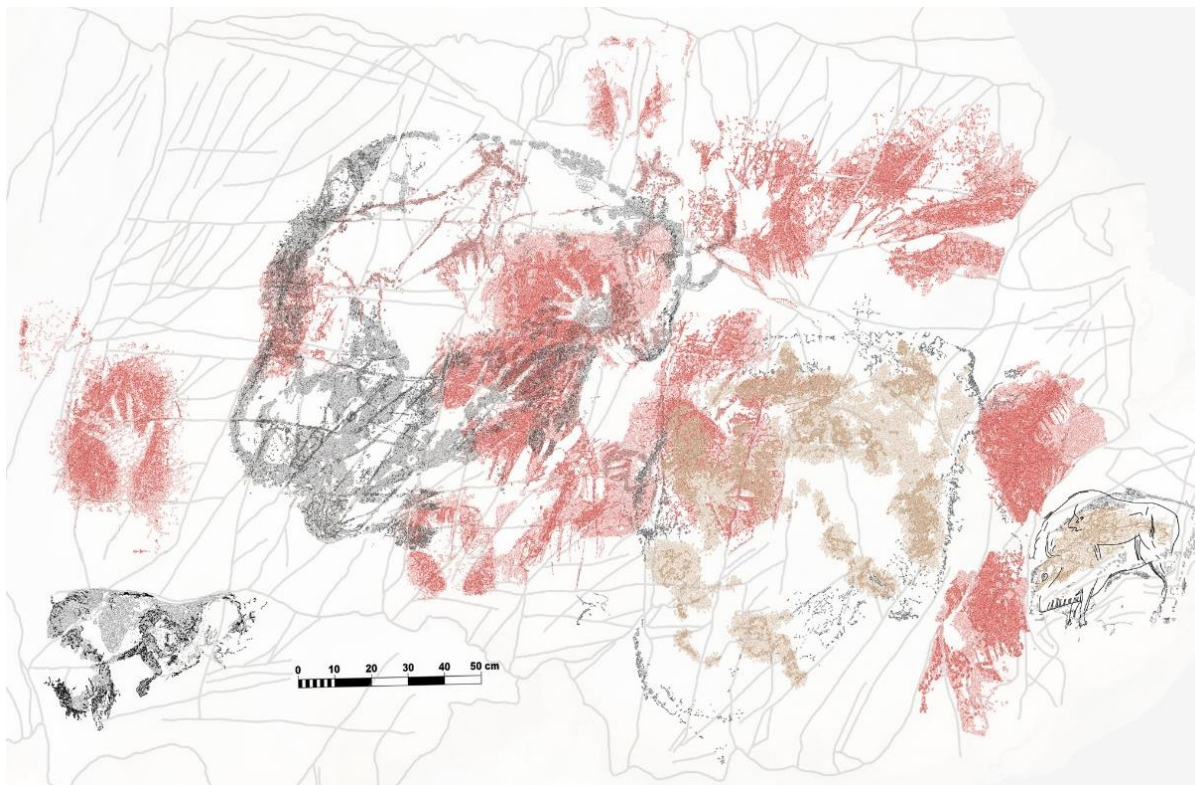


Figura 95: Resultado del análisis realizado en la zona de trabajo 6

Consiste en un grupo de bisontes policromos y sus figuras conexas que se encuentran en una especie de suave concavidad de la parte baja del muro. El primero, a la izquierda, en la parte superior, es un típico bisonte altamirense, en actitud de saltar hacia la derecha, con las patas recogidas bajo el cuerpo, las pezuñas muy bien indicadas y algunos detalles finamente grabados. Le falta el enlace entre la zona cervical y la giba.

Está situado sobre una superficie previamente pintada con manos negativas. Hay dos manos, una en la zona de la cabeza y otra debajo de las patas posteriores.

En la parte de la giba del bisonte hay dos pequeños dibujos de ciervas con la misma orientación que el bisonte. La de la derecha es de color ocre-rojizo y fue repasada en negro. La de la izquierda del mismo color ocre-rojizo, pero más desvanecida, es más completa.

A la izquierda del bisonte hay otra representación de un animal de la misma especie, de estilo diferente, de tamaño mucho menor y muy incompleta. Está orientada a la izquierda.

Debajo de la figura anterior hay otro bisonte policromo de tipo altamirense, también orientado a la derecha y muy mal conservado. El animal está parado y le falta gran parte de la

pata posterior, siendo la anterior muy rudimentaria. Tiene la papada delimitada por una línea de puntuaciones. Algunos detalles fueron finamente grabados.

Sobre la zona de la giba presenta dos manos con los dedos hacia abajo y una con los dedos hacia arriba.

La línea dorsal del bisonte se superpone a uno de los conocidos signos subcirculares que representan una vulva. A otro probable signo, muy perdido, corresponden seis pequeños trazos alineados que hay a la derecha de la cabeza del bisonte.

Por último, a la derecha y en una posición algo más baja, hay otro bisonte, de menor tamaño, pero bastante completo, del mismo estilo altamirenses. Se trata probablemente de un animal joven, parado, orientado a la izquierda y tiene indicadas las cuatro patas. El color, casi reducido a la parte delantera y media, está complementado con detalles finamente grabados. Tiene superpuesta la cabeza grabada de otro bisonte, con unas medidas muy similares al anterior en la zona frontal.


A modo de resumen, se han incrementado un 146% el número de figuras detectadas en el panel gracias al empleo de la metodología anteriormente descrita, y un 338% el número de manos respecto a la última revisión basada en imagen digital RGB y técnicas de decorrelación.

Tabla 9: Tabla resumen de figuras publicadas por Alcalde Del Río, *et.al.*, 1911) frente a las existentes tras la revisión

FIGURAS	ALCALDE DEL RÍO, H., BREUIL, H. y SIERRA, L. (1911)	REVISION
MANOS	6	27
BISONTES	5	5
UROS	1	1
CÉRVIDOS	2	3
IDEOMORFOS	1	1
TOTAL	15	37

6.2.7. Zona de Trabajo -7

6.2.7.1. Descripción

Zona de Trabajo -5 384-389 o 280
Localización
El Túnel, en la pared izquierda.
Descripción del motivo
Tectiforme o ideomorfo de espeso e intenso color vinoso de forma rectangular. En lo que sería el techo hay un solo pequeño resalte. El interior está muy subdividido o compartimentado. Alrededor hay algunos restos de color negro entre los que no se ha sabido identificar ninguna figura.
Caracterización del soporte
Motivos realizados sobre caliza cubierta por una capa calcita.
Caracterización técnica
Dibujo de tinta plana mediante óxido de hierro.
Estado de conservación
Sin observaciones.

Imagen

6.2.7.2. Técnicas empleadas

Decorrelación de imagen:

- Se han extraído las bandas decorreladas
- Se han generado composiciones en falso color a partir de las bandas decorreladas.

Análisis de Componentes Principales:

- - Se han extraído las bandas transformadas
- - Se han generado composiciones con las bandas transformadas.

Transformadas MNF:

- - Se han extraído las bandas transformadas
- - Se han generado composiciones con las bandas transformadas.

Transformadas ICA:

- - Se han extraído las bandas transformadas
- - Se han generado composiciones con las bandas transformadas.

Métodos para la generación de cartografía de pigmentos.

6.2.7.3. Descripción de las mejoras

1. Identificación de zonas afectadas por lixiviación y recubrimiento de calcita debido a una menor intensidad de la señal.



Figura 96: Zonas afectadas por lixiviación y recubrimiento calcítico.

2. Diferenciación espectral de acuerdo a las diferentes composiciones mineralógicas. En este caso se han distinguido, bajo la calcita zonas de ocre y negras.
3. Recuperación de los pigmentos: se documenta con nitidez los límites de los contornos de la figura, pudiéndose llevar a cabo una reconstrucción formal de motivo en función del tipo de pigmento.

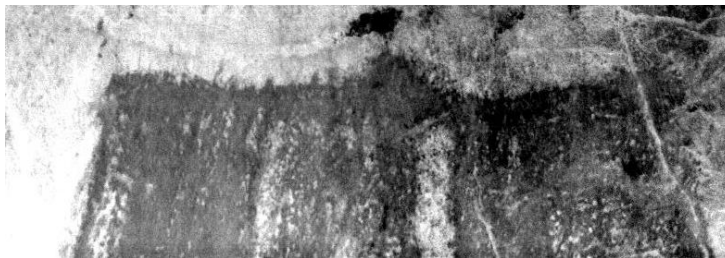


Figura 97: Recuperación de contornos de la figura

4. Extracción de pigmentos subyacentes bajo la costra calcítica y el pigmento ocre: en la imagen de la izquierda se observan las patas de una cabra y en la derecha la cabeza de un ciervo. Esto permite reconstruir la estratigrafía y el proceso de adición de motivos.

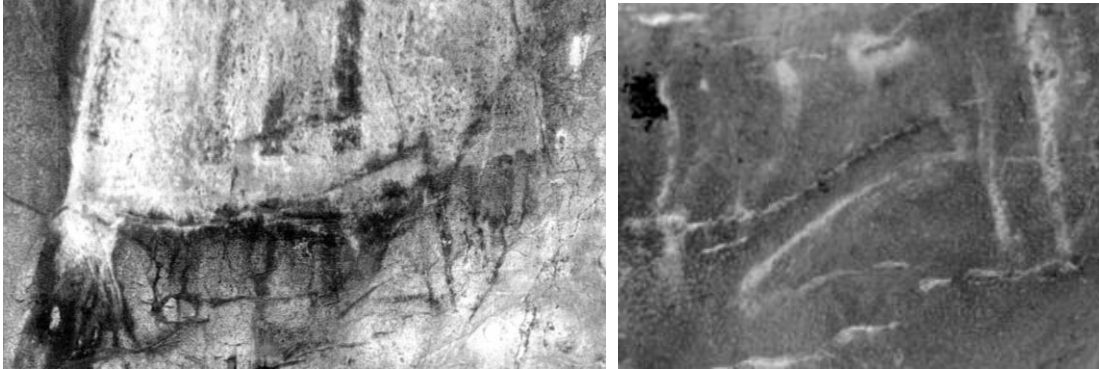


Figura 98: Extracción de pigmentos subyacentes bajo la costra calcítica y el pigmento ocre.

6.2.7.4. Comparación con lo conocido:

La única documentación del presente motivo es la que realizó H. Breuil en (Alcalde Del Río, *et al.* 1911).



Figura 99: Interpretación de Alcalde Del Río, *et al.* 1911 del Panel de la zona de trabajo 5

Se puede apreciar que el interior está muy subdividido o compartimentado.

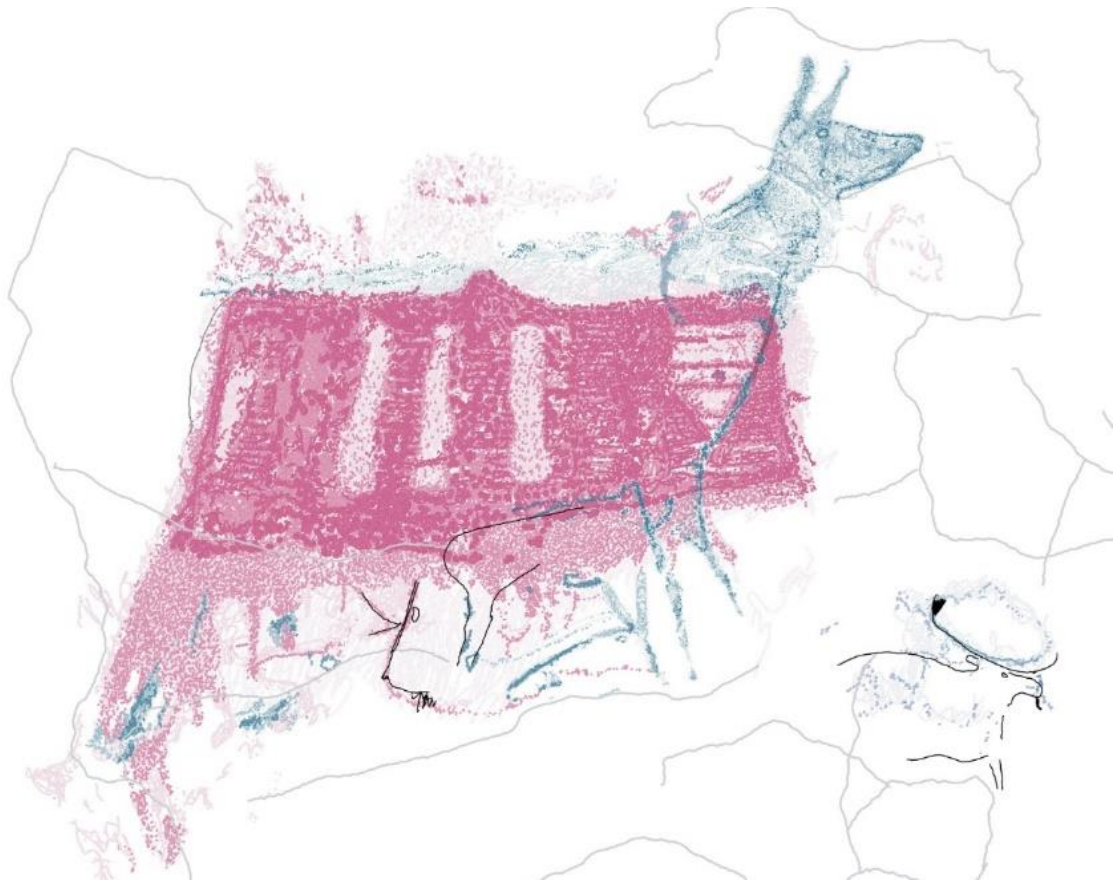


Figura 100: Nuevo calco obtenido mediante la integración de técnicas

Aparentemente este ideomorfo está pintado sobre una figura anterior ya que en la parte inferior derecha del mismo se aprecian unas patas pintadas en negro de un cuadrúpedo dispuesto hacia la izquierda. En el interior del tectiforme hemos descubierto una cabeza de ciervo orientada hacia la derecha. El análisis hiperespectral ha permitido mostrar con claridad que está en actitud de bramar, con la cabeza levantada y la boca abierta (en negro). Además, han aparecido otras figuras como la cabeza de una cierva mirando a izquierda, un reno y una cabeza de bisonte entre otros.



Figura 101: Superposición del calco sobre la ortoimagen en la zona de trabajo 5

Capítulo 7: Conclusiones

7.1. Introducción

El arte rupestre se suele situar en abrigos y cuevas y suele estar constituido por pinturas, dibujos, grabados, impresiones, tallas en bajorrelieve 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.

Las cavidades suelen formar parte de sistemas kársticos, que evolucionan a través del tiempo y pueden contener microhábitats en los que se desarrollan comunidades animales y vegetales.

Hoy en día se necesitan sistemas para gestionar sitios con arte y paisajes rupestres. La combinación de técnicas de geomáticas como la teledetección, fotogrametría y los sistemas de información geográfica permiten el desarrollo de una metodología operativa para cuantificar de una manera eficiente actuaciones que van encaminadas a llevar a cabo una gestión sostenible del patrimonio. Para ello es esencial disponer de una buena información sistematizada y con actualización periódica.

Durante el desarrollo de los capítulos anteriores, se han descrito una serie de pautas para poder georreferenciar con precisión y realizar estudios hiperespectrales en sitios con arte rupestre.

El capítulo 2 hace una revisión del estado del arte en lo que respecta a documentación y análisis de datos de teledetección aplicados al arte rupestre. Cuenta con tres apartados: georreferenciación de datos e integración de técnicas geomáticas, teledetección terrestre hiperespectral y caracterización de las fuentes de luz.

El capítulo 3 muestra las aportaciones de la tesis en un estudio de laboratorio para el control de la interacción luz-medio, analizando la eficiencia y viabilidad de diferentes fuentes de iluminación.

El capítulo 4 recopila una serie de buenas prácticas para la captura de información radiométrica en arte rupestre, describiendo la metodología propuesta, el equipamiento y una serie de conclusiones al respecto.

El capítulo 5 detalla la metodología para la extracción de información métrica y radiométrica, desde la captura de datos hasta el procesado de los mismos. Este capítulo expone la

técnica hiperespectral, su metodología para la resolución de los problemas que se plantean y otro apartado donde se detallan las zonas estudiadas siguiendo la metodología desarrollada aplicada a diferentes casuísticas.

El capítulo 6 muestra los resultados obtenidos y los compara con resultados obtenidos en anteriores investigaciones realizadas a lo largo de los últimos 110 años.

7.2. Conclusiones generales

La importancia que se le da a la geomática (o tradicionalmente a la topografía), dentro de la espeleología, estriba en que cualquier estudio posterior al descubrimiento de una cavidad necesita un plano para poder localizar todo lo que en ella se halla. Esta es la razón por la que levantamiento topográfico es una de las primeras labores que se realizan cuando se va a estudiar una cavidad.

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 cárstico 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.

Por otro lado, 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 hiperespectrales, ha de ser procesada cuidadosamente para poder obtener resultados útiles para el fin propuesto.

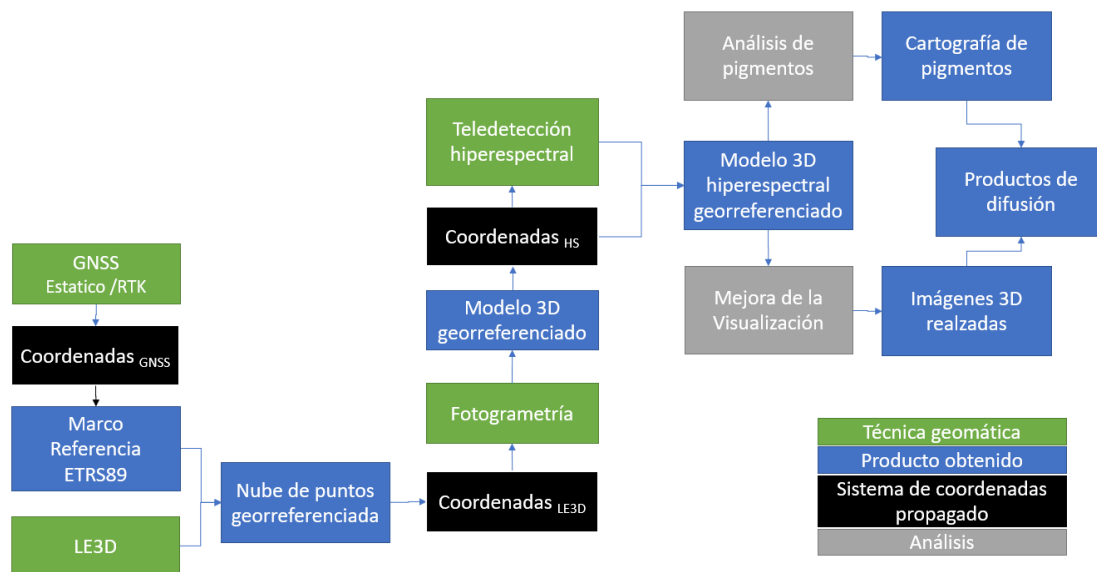
7.3. Conclusiones particulares

A continuación, se presentan las conclusiones particulares principales referidas a las metodologías planteadas.

7.3.1. Georreferenciación y geomática

Se ha planteado un diagrama de flujo que permite poder generar documentación métrica de alta precisión y detalle de elementos tan complejos y singulares como las cuevas y las cavidades en los que los métodos tradicionales topográficos son arduos y difíciles de aplicar.

Para el correcto procesado de georreferenciación de los datos de teledetección hiperespectral, es necesario seguir los siguientes pasos.



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 todo el panel para analizar las desviaciones respecto al modelo fotogramétrico.

7.3.2. Corrección radiométrica de los datos del sensor.

Para que los datos aportados por un sensor sean correctos, dicho sensor debe estar correctamente calibrado radiométricamente. Esto hace referencia a la relación existente entre la radiancia detectada por el sensor y la señal de salida del mismo. Generalmente se calibran en laboratorio, si bien, para aumentar la precisión, se pueden calibrar mediante el empleo de medidas de radiómetros de campo.

Además, se han de controlar las líneas o píxeles perdidos y registrar y georeferenciar con precisión los datos.

7.3.3. Procesado de los datos corregidos

Se han desarrollado, testeado, comprobado y validado una metodología que permite analizar la señal de la información espectral capturada, para poder extraer conclusiones acerca de las mismas. Los procesos integrados se han clasificado en dos familias; por un lado las técnicas de análisis de pigmentos cuyo fin es generar cartografía de pigmentos y poder distinguir entre los que son iguales y no y por otro las técnicas de mejora de visualización cuyo fin es poder recuperar pinturas que no se ven a simple vista.

Los métodos de análisis de pigmentos se basan en transformadas MNF, a partir de las cuales se buscan los píxeles más puros espectralmente hablando mediante PPI que se calcula proyectando repetidamente diagramas de dispersión n-D en un vector unitario aleatorio. Por último el mapeador de ángulo espectral (SAM) es una clasificación espectral basada en la física que utiliza un ángulo n-D para hacer coincidir los píxeles con los espectros de referencia. El algoritmo determina la similitud espectral entre dos espectros calculando el ángulo entre los espectros y tratándolos como vectores en un espacio con dimensionalidad igual al número de bandas.

Los métodos de mejora de visualización se basan en métodos de decorrelación para mejorar la separación de color en imágenes con alta correlación entre canales, transformadas de componentes principales, transformadas de fracción de mínimo ruido y análisis de componentes independientes.

7.3.4. Espectroradiómetro

Las firmas espectrales ayudan a determinar si dos tipos de pigmentos pueden distinguirse entre sí. El uso del espectroradiómetro es importante cuando se pretenden diferenciar espectralmente diferentes tipos de pigmentos y potencialmente determinar sus composiciones químicas y por consiguiente en el origen de los pigmentos existentes.

El uso del espectroradiómetro ha permitido diferenciar dos tipos de ocre en las manos del panel que posteriormente, la interpretación arqueológica ha asociado a dos fases diferentes.

Se puede afirmar que es posible diferenciar entre diferentes tipos de pigmentos, que a la vista del ojo desnudo son indistinguibles. Esto es posible gracias a que la firma espectral (y los procesos de teledetección hiperespectral, en vez de emplear la información del visible, integran parte del espectro ultravioleta e infrarrojo, donde su diferente composición ofrece señales diferentes. Los datos de las firmas espectrales se emplean para analizar la

separabilidad entre clases, es decir, saber cuántos tipos de pigmento es posible distinguir y posteriormente se integran en el procesado de las nubes.

7.4. Conclusiones sobre el problema de investigación

A la vista del trabajo realizado se puede concluir en primer lugar que el uso de técnicas combinadas geomáticas como la poligonal topográfica y los GNSS (Sistemas de Globales de Navegación por Satélite) con otros modernos como el Láser Escáner 3D ofrece una mejora en la fiabilidad espacial de los datos respecto a los métodos tradicionales ya que permite documentar cuevas de una manera rigurosa, inocua para el posible patrimonio histórico como pinturas y grabados, totalmente respetuosa con el medio, eficaz y eficiente, dentro de un marco de referencia global. Además:

- El ajuste de la red permite realizar una prueba estadística para eliminar errores groseros.
- Todas las posiciones de los escaneos se derivan del punto ajustado de una red local y es posible derivar indicadores de la calidad.
- Aumentar la precisión en la observación de los puntos de control terrestre: menor a 1 mm si se emplean dianas en comparación con los 5-7 mm de diámetro del haz láser en los sistemas de medición de prismas de las Estaciones Totales Topográficas (ETT).
- Poder contar con puntos de control bien distribuidos en todo el panel para analizar las desviaciones del modelo fotogramétrico.

El uso del láser escáner 3D, debido a la rapidez operativa de campo, la exactitud de los datos, las posibilidades de representación y la inocuidad puede considerarse como una herramienta óptima para el patrimonio histórico. Hace que la documentación de las cuevas sea más sostenible, ya que permite:

- Reducir el tiempo de permanencia en la cueva, y por lo tanto el impacto en la misma.
- Evitar el uso de elementos de puntería como dianas, reduciendo el riesgo de daños y la inserción de elementos que puedan causar deterioros (como hongos y bacterias).
- Dicha información, en una primera fase, puede ser empleada para extraer documentación cartográfica tradicional de las cuevas tal como mapas, información de monteras, alturas de galerías o curvas de nivel que pueden ser empleados como base por los gestores de las mismas para ayudar a la toma de decisiones y realizar

diferentes simulaciones de procesos de comportamiento predictivo dentro de un sistema basado en el conocimiento.

- Una salida más novedosa que la documentación cartográfica consiste en la creación de modelos virtuales de elementos patrimoniales, permitiendo la explotación turística de dichos recursos, y evitando el deterioro por el uso abusivo. En definitiva, es una solución que permite conseguir un punto de equilibrio entre conservación y difusión.

En la presente tesis, se ha empleado un método de registro que integra diferentes técnicas geomáticas (Teledetección, fotogrametría y laser escáner 3D). Éste genera un tipo de documentación apropiada para los casos que se han tratado de arte parietal y biodeterioro. Gracias a estar georreferenciada y gestionada en 3D permite establecer series temporales con una resolución subpixel, frente a las comparativas imagen-imagen de los métodos tradicionales en los que, si el centro de proyección no coincide, las perspectivas cónicas no son comparables. La clave radica en, una vez dispuesta la información capturada en 3D, se genera una nueva imagen, empleando el mismo plano de proyección ortogonal con las diferentes campañas. Con esto dispone de una proyección ortogonal ajustada al plano de estudio que carece de diferenciales de escala debidos a la perspectiva (proyección cónica original) y unifican las resoluciones espaciales de los píxeles, haciendo las escenas totalmente comparables.

En caso de limitaciones de recursos económicos, el sistema planteado es escalar y se puede hacer que el proceso documentación se cubra gradualmente pudiendo hacer uso tanto de información presente como pasada.

Disponer una metodología como la presentada 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 y permitir la gestión 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 (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.

Se han generado una serie de buenas prácticas para el registro de datos geométricos y radiométricos con el objeto de poder repetir el experimento por cualquier otra persona.

La presente tesis pretendía abarcar cinco ámbitos de trabajo que tuvieran un alto potencial en el estudio de este tipo de manifestaciones gráficas. Los ámbitos planteados fueron: a) el reconocimiento de la materia colorante; b) el reconocimiento formal de las figuras; c) el reconocimiento del proceso técnico; d) la documentación del estado de conservación y e) biodeterioro.

Una vez procesadas las zonas de trabajo, se puede concluir.

- 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 rupestre. 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 pigmentos naturales con el fin de obtener patrones precisos y poder vincular determinados espectros con composiciones mineralógicas precisas. El desarrollo y profundización de este ámbito supondrá una aportación relevante, a medio o largo plazo, al conocimiento, al menos relativo, de la composición de los pigmentos sin llevar a cabo la toma de muestras.
- En cuanto a la reconstrucción de los motivos rupestres. La mayor parte de las figuras localizadas en el interior de cavidades se encuentran sujetas a procesos naturales y artificiales que originan la pérdida de materia colorante o la erosión de superficies grabadas que implican una lectura, en muchos casos, poco definida de los motivos. 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. Además, la aplicación técnica propuesta ha permitido una lectura muy precisa (por la diferenciación con el soporte) de las figuras grabadas, hasta el punto de definir con plena exactitud una discriminación entre los surcos grabados y fisuras, grietas, etc. del soporte. De este modo, figuras que en la actualidad presentan dificultades de visualización pueden ser “reconstruidas” y de este modo permitir estudios formales precisos o incluso servir de apoyo eficiente para la realización de facsímiles.

- 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 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 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 tafonómica 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. Aplicada y valorada esta metodología a largo plazo a un mismo motivo, permitirá estudiar las acciones y la frecuencia e intensidad de cada una de ellas, obteniéndose un registro exhaustivo que esté por encima de descripciones subjetivas y poco precisas.

En conclusión, se puede apuntar que la aplicación de las tecnologías de teledetección multispectral e 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.

Desde los propios ensayos de iluminación en laboratorio, que han conducido a la elaboración de buenas prácticas para la captura de datos sobre un patrimonio tan frágil como el arte parietal, hasta el protocolo de captura y procesamiento de datos, los trabajos realizados con los sensores, proporcionan una herramienta muy útil para la documentación del arte rupestre en los diferentes aspectos de caracterización de colorantes, reconstrucción de los procesos técnicos y determinación y seguimiento del estado de conservación de los motivos decorados. Además, y como consecuencia de lo anterior, presenta un alto potencial para la reconstrucción de “imágenes” del arte rupestre en el momento en que fueron trazadas las figuras, con las implicaciones que esto puede tener en la difusión y puesta en valor de este Patrimonio.

Se puede afirmar, por consiguiente, que los resultados del trabajo desarrollado cumplen plenamente los objetivos marcados y revelan el alto potencial de este equipo para la gestión del patrimonio cultural.

7.5. Investigaciones futuras

Una vez finalizado el desarrollo de esta Tesis Doctoral, y dentro de esta misma línea, se han forjado nuevos temas de investigación susceptibles de ser analizados en el futuro, sobre todo pensando en la importancia del aporte que puede generarse en materia de documentación, gestión y difusión de arte rupestre. A continuación se describen algunas posibles investigaciones futuras.

Georreferenciación y geomática: Una vez se dispone del modelo 3D del panel documentado que ha sido obtenido por fotogrametría, se puede plantear en vez de hacer un registro y una georreferenciación realizar una ortocorrección de los datos registrados para generar un ortoimagen verdadera hiperespectral de reflectancias. Dicho documento se documenta por tener una proyección ortogonal realizada sobre un modelo digital de superficies con datos de reflectancia de todas las bandas capturadas.

Sistema de iluminación: Sistema de luz continua con baja emisión de ultravioletas y emisividades que permita reducir el impacto de las fuentes de luz sobre el medio biótico y

abiótico. El sistema podría estar basado en una matriz de LEDs que emitiesen en todo el espectro de trabajo operativo.

Corrección radiométrica de los datos: Interesaría la integración directa entre el espectroradiómetro y la cámaras hiperespectral para disponer en tiempo real de firmas espectrales y poder analizar similitudes con librerías espectrales para ganar operatividad en campo.

Procesado de datos corregidos: El objetivo del análisis de componentes principales robusto es el de obtener las componentes principales que no se ven muy influenciadas por los datos anómalos (*outliers*). Un primer grupo de métodos se obtienen reemplazando la matriz de varianza-covarianza clásica por un estimador de covarianza robusto. Algunos de los procedimientos más clásicos utilizaban M-estimadores de dispersión equivalentes afines pero presentaban el inconveniente de no soportar muchos datos anómalos. Más recientemente se han utilizado estimadores de análisis tales como el determinante de covarianza mínima (MCD) y los S-estimadores. Los resultados que ofrecían estos métodos eran más robustos pero estaban limitados a unas determinadas dimensiones no muy grandes. Una segunda aproximación al ACP robusto utiliza técnicas de proyección (PP) de manera que se maximiza una medida de dispersión robusta para obtener las consecutivas direcciones en las que proyectar los puntos.

El objetivo de los ACP robustos es determinar por un lado una combinación lineal de las variables originales que contengan la mayor cantidad de información incluso en el caso de que existan *outliers* y posteriormente determinar cuáles son dichos datos anómalos y de qué tipo. No siempre los datos anómalos son datos erróneos, sino que, en ocasiones son la indicación de algo inesperado.

Rousseeuw y van Zomeren (1990) propusieron un método para detectar outliers que consistía en calcular la distancia entre cada dato de la matriz de datos y el centro de la elipse determinada por el estimador elipsoide de mínimo volumen. Ellos utilizaron una distancia robusta análoga a la de Mahalanobis, la cual tiene una distribución chi-cuadrado. Aquellos puntos, más allá del correspondiente cuantil de la chi-cuadrado, se califican como *outliers* o datos anómalos, pero se recomendaba no utilizar este método si, al menos, no es $n/p > 5$.

Existen métodos que combinan las ventajas de ambos procedimientos, es decir la búsqueda de proyecciones y los estimadores de covarianza robustos, de manera que se

pueden detectar y clasificar los datos anómalos. Este método que ha sido propuesto por (Hubert y Engelen, 2004) puede aplicarse a conjuntos de datos de diferente dimensionalidad.

Capítulo 8: Bibliografía

- Alcalde Del Río H., Breuil H., Sierra L., 1911. Les cavernes de la Région Cantabrique (Espagne), Chêne, Monaco
- Barrera, S., Otaola, A. and Bayarri-Cayón, V. (2009) 'Explotación turística no intrusita de la Cueva de Santimamiñe (Vizcaya) mediante realidad virtual.', II Congreso español de cuevas turísticas. Asociación de Cuevas Turísticas Española, pp. 359–371.
- Barton H.A., Taylor N.M., Kreate M.P., Springer A.C., Oehrle S.A., Bertog J.L., 2007. The impact of host rock geochemistry on bacterial community structure in oligotrophic cave environments. *International Journal of Speleology*, 36: 93-104.
- Bastian, F., Jurado, V., Novakova, A., Alabouvette, C., Saiz-Jimenez, C., 2010. The microbiology of Lascaux Cave. *Microbiology*, 156 (3), 644-652.
- Bayarri-Cayón, V, Latova, J., Castillo, E., Lasheras, J.A., De Las Heras, C., Prada, A., 2015. Nueva ortoimagen verdadera del Techo de Polícromos de la Cueva de Altamira, in: ARKEOS | Perspectivas Em Diálogo, No 37. Symbols in the Landscape: Rock Art and Its Context. Presented at the XIX International Rock Art Conference IFRAO 2015, pp. 2308–2320.
- Bayarri-Cayón, V, Latova, J., Castillo, E., Lasheras, J.A., De Las Heras, C., Prada, A., 2015b. Nueva documentación y estudio del arte empleando técnicas hiperespectrales en la Cueva de Altamira, in: ARKEOS | Perspectivas Em Diálogo, No 37. Symbols in the Landscape: Rock Art and Its Context. Presented at the XIX International Rock Art Conference IFRAO 2015b, pp. 2293–2308.
- Bayarri-Cayón, V., Castillo, E., 2009. Caracterización geométrica de elementos complejos mediante la integración de diferentes técnicas geomáticas. Resultados obtenidos en diferentes cuevas de la Cornisa Cantábrica., in: Proceedings of the VIII Semana Geomática Internacional. Presented at the 8a Semana de Geomática, Barcelona.
- Bayarri-Cayón, V., Castillo, E., 2012. Geometric characterization and analysis of complex elements through the integration of different geomatics techniques. Application to caves., in: Workshop on Landscape and Spatial Analysis in Archaeology. Presented at the Debating Spatial Archaeology. International, Santander, España, pp. 213–223.
- Bayarri-Cayón, V., Castillo, E., García-Moncó, J.M., Calonge, J., 2013. Integration of traditional and innovative techniques to resolve a complex case: Monitoring the movement and temperature influence of the canvas in the south transept of the Church of the

- Convent of San Luis in San Vicente de la Barquera (Cantabria)., in: Built Heritage 2013. Presented at the Monitoring Conservation and Management, Milano, Italy.
- Bayarri-Cayón, V., Castillo-López, E., Domínguez, J.A., 2016. An Automatic Approach for documentation and recovery of rupestrian paintings using Multispectral Remote Sensing. *Recent Advances in Mathematics and Computational Science* 134–140.
- Bayarri-Cayón, V., Ontañón, R., Castillo, E., 2014d. Tracking biodeterioration processes by photogrammetric methods, in: Session A11c: New Solutions for Old Problems: The Use of New Technologies for the Documentation and Conservation of Prehistoric Art. Presented at the XVII International Congress of Prehistoric and Protohistoric Sciences 2014, Burgos, España.
- Ben-Dor, E., K. Patkin, A. Banin., A. Karnieli. 2002. Mapping of several soil properties using DAIS -7915 hyperspectral scanner data -a case study over clayey soils in Israel. *Int. J. Remote Sens.* 23, 1043-1062.
- Berthelin, J. 1983. Microbial weathering processes. En W.E. Krumbein (ed.) *Microbial geochemistry*: 223-262. Oxford: Blackwell.
- Bjerhammar, A. 1973. *Theory of Errors and Generalized Matrix Inverses*, Elsevier Science Ltd, New York. ISBN: 9780444409812.
- Boardman, J. W., Kruse, F. A., 1994, Automated spectral analysis: a geological example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada: in Proceedings, ERIM Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI, pp. I-407 - I-418.
- Cañaveras, J.C., Hoyos, M., Sanchez- Moral. S., Sanz-Rubio, E., Bedova, J., Soler, V., Croth, I., Schumann, P., T-Aiz, L., González, I., Saiz-Jimenez, C., 1999. Microbial communities associated with hydromagnesite and needle-fiber aragonite deposits in a karstic cave (Altamira, Northern Spain). *Geomicrobiology Journal*. 16. 9-25.
- Cañaveras, J.C., Sanchez-Moral, S., Soler, V., Saiz-Jimenez, C., 2001. Microorganisms and microbially induced fabrics in cave walls. *Geomicrobiology Journal*. 18. 223-240.
- Clark, R.N. 1999. Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy. In: «Manual of Remote Sensing, Volume 3, Remote Sensing for the Earth Sciences », A.N.Rencz, ed. John Wiley & Sons, New York, 3-58.
- Comon, P. 1994. Independent component analysis—a new concept? *Signal Processing*, 36:287–314.

- Croth, I., Vettermann, R., Schuetze, B., Schumann, P., Saiz-Jimenez, C., 1999. Actinoincetes in karstic caves of Northern Spain (Altamira and Tito Bustillo). *Journal of Microbiological Methods*. 36, 115-122.
- Cuezva, S., Fernandez-Cortes, A., Porca, E., Pašić, L., Jurado, V., Hernández-Marine, M., Serrano-Ortiz, P., Hermosin, B., Cañaveras, J.C., Sanchez-Moral, S., Saiz-Jimenez, C. 2012 The biogeochemical role of Actinobacteria in Altamira Cave, Spain. *FEMS Microbiol Ecol*. 2012 Jul:81(1):281-290
- Echegaray, J.G.; Romanillo, J.A.M. 1970. Figuras rupestres inéditas de la Cueva del Castillo (Puente Viesgo). *Boletín del Seminario de Estudios de Arte y Arqueología*, 36, 441–446.
- Espeleo Club de Gràcia, 1982. Revista "Exploracions." nº 6. Espeleoclub de Gracia, Barcelona. Dep Legal: B-38770-1977
- Fortea-Pérez J. 1993. La protección y conservación del arte rupestre paleolítico. *Columbres (Asturias): Servicio de Publicaciones del Principado de Asturias.*
- Gárate-Maidagán, D., 2006. Nuevos datos en torno al inicio del arte parietal cantábrico: la aportación de un caballo inédito en el Panel de Manos de la Cueva del Castillo (Puente Viesgo, Cantabria). *Sautuola /XII. Instituto de Prehistoria y Arqueología "Sautuola". Santander (2006),351-358. ISSN: 1133-2166*
- García-Guinea, M.A.; González-Echegaray, J . 1966. Nouvelles représentations d'art rupestre dans la grotte del Castillo. *Préhistoire et Spéléologie Ariégoises*. XXI , 441–446.
- Gillespie, *et al.* 1986: Color enhancement of highly correlated images. I. Decorrelation and HSI contrast stretches. *Rem. Sens. Environ.*, 20, 209-235.
- González, J.M., Saiz-Jiménez, C. 2004. Microbial diversity in biodeteriorated monuments as studied by denaturing gradient gel electrophoresis. *Journal of Separation Science*, 27: 174–180
- Granshaw, S.I., 1980. Bundle adjustment methods in engineering photogrammetry. *Photogramm. Rec.* 10 (56), 181–207.
- Green, A. A., Berman, M., Switzer, P., Craig, M. D., 1988, A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 26, no. 1, p. 65-74.
- Groth, I., Saiz-Jimenez, C.. 1999. Actinoincetes in hypogean environments. *Geomicrobiology Journal*, 16.1-8.

- Groth, I., Schumann, P., Latz, L., Sanchez-Moral, S., Cañaveras, J.C., And Saiz-Jimenez, C.. 2001. Geomicrobiological study of the Grotta dei Cervi, Porto Badisco. Italy. *Geomicrobiology Journal*, 18. 241-258.
- Handpas. Manos del pasado. Catálogo de representaciones de manos en el arte rupestre paleolítico de la península ibérica, Chapter: La Cueva de El Castillo, Publisher: Hipólito Collado Giraldo (Coord.), 2018. Web: <http://handpas.juntaex.es/listing/castillo-el/> consulta: 3-3-2020.
- Hoyos, M., Soler, V., Cañaveras, J.C, Sanchez-Moral, S., Sanz-Rubio, E.. 1998. Microclimatic characterization of a karstic cave: human impact on microenvironmental parameters of a prehistoric rock art cave (Candamo Cave, northern Spain). *Environmental Geology*. 33, 231-242.
- Hubert, M., Van Driessen, K. (2004), Fast and robust discriminant analysis, *Computational Statistics and Data Analysis*, 45, 301-320.
- Hyvärinen, A. (1998). Independent component analysis in the presence of gaussian noise by maximizing joint likelihood. *Neurocomputing*, 22:49–67.
- Hyvärinen, A. (1999b). Gaussian moments for noisy independent component analysis. *IEEE Signal Processing Letters*, 6(6):145–147.
- Hyvärinen, A., Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis, *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 10, no. 3, pp. 626-634, 1999.
- Hyvärinen, A., Oja, E. 2000 Independent component analysis: algorithms and applications, *Neural Networks*, vol. 13, no. 4-5, pp. 411-430.
- Jensen, J.R. 2000. *Remote Sensing of Environment. An Earth resource perspective*. Prentice Hall, Upper Saddle River (NJ), USA. 544 pp.
- Jensen, J.R. 2007. *Introductory to Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*.
- Juberthie, C. 1995. *Underground habitats and their protection*. Council of Europe Publishing.
- Jurado, V., Fernández-Cortés, A., Cuezva, S., Laiz, L., Cañaveras, J.C., Sánchez-Moral, S. and Saiz-Jiménez, C. 2009. The fungal colonization of rock art caves. *Naturwissenschaften*, 96 (9), 1027-1034.
- Jurado, V., Sanchez-Moral, S. and Saiz-Jimenez, C. 2008. Entomogenous fungi and the conservation of the cultural heritage: A review. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 62 (4), 325-330.

- Jutten, C. and Héroult, J. 1991. Blind separation of sources, part I: An adaptive algorithm based on neuromimetic architecture. *Signal Processing*, 24:1–10.
- Laiz, L. Groth, I., Schumann, P., Zezza, F., Feiske, A., Hermosin, B., And Saiz-Jimenez, C., 2000. Microbiology of the stalactites from Grotta dei Cervi. Porto Badisco. Italy. *International Microbiology*. 3, 25-30.
- Laiz, L., Groth, I., Gonzalez, I., Saiz-Jimenez, C., 1999. Microbiological study of the dripping waters in Altamira cave (Santillana del Mar. Spain), *Journal of Microbiological Methods*. 36. 129-138.
- LasHeras, J.A., De Las Heras, C., Fatás, P., Prada, A. 2014. capítulo: Altamira y su futuro. Libro: *The Conservation of Subterranean Cultural Heritage*. CRC Press/Balkema. Taylor & Francis Group. 2014. ISBN: 978-1-138-02694-0 (Hbk) ISBN: 978-1-315-73997-7 (eBook PDF).
- López-García P., Philippe H., Gail F., Moreira D. 2003. Autochthonous eukaryotic diversity in hydrothermal sediment and experimental microcolonizers at the Mid-Atlantic Ridge. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100: 697–702.
- Montes, R., Bayarri-Cayón, V., Muñoz, E., Morlote, J.M., Ontañón, R., 2017. Avance al estudio del registro gráfico paleolítico de la Cueva de Solviejo (Voto, Cantabria, España). *Cuadernos de Arte Prehistórico Número 3*.
- Muñoz, E., Ontañón, R., Bayarri-Cayón, V., Montes, R., Morlote, J.M., Bayarri-Cayón, V., Herrera, J., Gómez, A., n.d. La Cueva de Cueto Grande (Miengo, Cantabria-España). Un nuevo conjunto de grabados paleolíticos en la región Cantábrica., in: *ARKEOS | Perspectivas Em Diálogo*, No 37. Symbols in the Landscape: Rock Art and Its Context. Presented at the XIX International Rock Art Conference IFRAO 2015, pp. 945–967.
- Nováková A. 2009. Microscopic fungi isolated from the Domica Cave system (Slovak Karst National Park, Slovakia). A review. *International Journal of Speleology*, 38 (1), 71-82.
- Ontañón, R., Bayarri, V., Castillo, E., Montes, R., Morlote, J.M., Muñoz, E., Palacio, E., 2019. New discoveries of pre-Magdalenian cave art in the central area of the Cantabrian region (Spain). *Journal of Archaeological Science: Reports* 28, 102020.
- Ontañón, R., Bayarri, V., Herrera, J., Gutierrez, R., 2014. The conservation of prehistoric caves in Cantabria, Spain, in: Saiz-Jimenez, C. (Ed.), *The Conservation of Subterranean Cultural Heritage*. CRC Press, pp. 185–192. <https://doi.org/10.1201/b17570-23>
Prentice Hall Series in Geographic Information Science.

- Rashmi, S. , Swapna A. , Venkat, Ravikiran S. (2014) Spectral Angle Mapper Algorithm for Remote Sensing Image Classification. International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology, Vol. 1 Issue 4, June 2014. ISSN 2348 – 7968
- Richards, J.A., 1999. Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. Springer-Verlag, Berlin, Germany, p. 240.
- Ripoll Perelló, E. 1956. Nota acerca de algunas nuevas figuras rupestres de las cuevas de El Castillo y La Pasiega (Puente Viesgo, Santander). En Actas del IV Congreso Internacional de Ciencias Prehistóricas y Protohistóricas (Madrid 1954); Instituto panamericano de geografía e historia, Zaragoza , Spain, pp. 301–310.
- Ripoll, S., Bayarri, V., Muñoz F.J., Latova, J., Gutiérrez, R., Pecci, H. 2014. El arte rupestre de la cueva de El Castillo (Puente Viesgo, Cantabria). Unas reflexiones metodológicas y una propuesta cronológica. Capítulo en libro cien años de arte rupestre paleolítico centenario del descubrimiento de la cueva de la Peña de Candamo (1914-2014). Ediciones Universidad de Salamanca. ISBN: 978-84-9012-480-2
- Ripoll, S., Latova, J., Bayarri-Cayón, V., Castillo, E., 2013. Análisis espacial del arte rupestre en el entorno del Sistema Central. Presented at the Simposio Iberoamericano de Análisis Espacial en Arqueología, Santander, España.
- Romanillo, J.A.M.; Sainz, C.G. 2000. Cronología del arte paleolítico cantábrico: Últimas aportaciones y estado actual de la cuestión. In Actas del 3er Congreso de Arqueología Peninsular; ADECAP: Vila Real, Portugal; Volume II, pp. 461–473.
- Ronald E. Alley, 1996, Algorithm Theoretical Basis Document for Decorrelation Stretch, NASA, JPL.
- Rousseeuw, P.J., van Zomeren, B.C. (1990). Unmasking multivariate outliers and leverage points (with discusión). Journal of the American Statistical Association, 85, 633-639
- Ruiz-Redondo, A. 2010. Munibe Antropología-Arqueología 61, 2010, pp.17-27 S. C. Aranzadi. Z. E. Donostia/San Sebastián, ISSN 1132-2217
- Sabins, F.F.. 1987 Remote Sensing, Principles and Interpretation. Second edition. W.H. Freeman and Co., San Francisco, 426 p.
- Sampieri, R.H. Fernández, C., y Baptista, P. Metodología de la Investigación. McGraw-Hill. México. 2006. 4ª Edición. ISBN: 970-10-5753-8.

- Schabereiter-Gurtner C., Saiz-Jimenez C., Piñar G., Lubitz W. & Rölleke S. 2002 - Altamira Cave Paleolithic paintings harbour partly unknown bacterial communities. *FEMS Microbiology Letters*, 211: 7-11.
- Schowengert, R.A., 1997, *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*, 2nd Edition, Academic Press, New York.
- Van Breemen N., Finlay RF., Lundstrom U., Jongmans A.G., Giesler R. & Olsson M. 2000. Mycorrhizal weathering: a true case of mineral plant nutrition. *Biogeochemistry*, 49: 53–67. Vassilev N., Franco I., Vassileva M. & Azcon R. 1996 - Improved plant growth with rock phosphate solubilized by *Aspergillus niger* grown on sugar-beet waste. *Bioresource Technology*, 55: 237–241
- Wakelin S.A., Warren R.A., Harvey P.R. & Ryder M.H.. 2004. Phosphate solubilization by *Penicillium* spp. closely associated with wheat roots. *Biology and Fertility of Soils*, 40: 36–43.