

Tabla de Contenidos

Resumen	5
Abstract	6
Agradecimientos	8
Tabla de Contenidos	9
Lista de Figuras	12
1. Estado del arte	13
1.1. Introducción	13
1.1.1. Objeto de la investigación.....	14
1.1.2. Objetivos.....	15
1.1.3. Metodología propuesta	17
1.1.4. Relevancia del problema y contribución de la investigación.....	20
1.2. Antecedentes	22
1.2.1. Evolución de los estudios sobre la Cueva de Altamira.....	22
1.2.2. Antecedentes en otras cuevas	25
1.3. Resultados de la revisión de la literatura: avances y vacíos de conocimiento	28
1.3.1. Desafíos Abordados en la Presente Investigación	30
2. Metodología	31
2.1. Establecimiento de redes geodésicas de referencia	32
2.1.1. Sistema GNSS (<i>Global Navigation Satellite System</i>).....	32
2.1.2. Estación Topográfica Total (ETT) y redes microgeodésicas.....	33
2.2. Escaneo láser 3D	34
2.3. Fotogrametría	35
2.3.1. Fotogrametría aérea mediante vehículos aéreos no tripulados	35
2.3.2. Fotogrametría terrestre del techo de la Sala de Polícromos.....	36
2.4. Radar de penetración terrestre	38
2.4.1. Desde el exterior hacia la Sala de Polícromos	38
2.4.2. Desde el interior hacia el exterior.....	40
2.5. Integración y modelado tridimensional	42
2.5.1. Proceso de integración del modelo 3D.....	42
2.5.2. Resultados del modelo 3D integrado	44

2.6. Análisis y validación de resultados	45
2.6.1. Cartografía de flujos de agua y gases	45
2.6.2. Validación mediante observaciones in situ	45
2.6.3. Seguimiento del biodeterioro y lixiviación de pigmentos	46
2.6.4. Conclusiones del análisis validado	46
3. Publicaciones científicas	48
Publicación 1: <i>Integration of Remote-Sensing Techniques for the Preventive Conservation of Paleolithic Cave Art in the Karst of the Altamira Cave</i> - "Integración de técnicas de teledetección para la conservación preventiva del arte rupestre en Altamira"	48
Publicación 2: <i>A Multimodal Research Approach to Assessing the Karst Structural Conditions of the Ceiling of a Cave with Palaeolithic Cave Art Paintings: Polychrome Hall at Altamira Cave (Spain)</i> - "Un enfoque de investigación multimodal para evaluar las condiciones estructurales kársticas del techo de una cueva con pinturas rupestres paleolíticas: Sala de Polícromos de la Cueva de Altamira (España)"	49
Publicación 3: <i>Multisensory Analysis of the Moisture Course of the Cave of Altamira (Spain): Implications for Its Conservation</i> "Análisis Multisensorial del Curso de Humedad de la Cueva de Altamira (España): Implicaciones para su conservación "	50
Publicación 4: <i>Remote Sensing and Environmental Monitoring Analysis of Pigment Migrations in Cave of Altamira's Prehistoric Paintings</i> "Análisis por teledetección y monitorización ambiental de las migraciones de pigmentos en las pinturas prehistóricas de la Cueva de Altamira"	51
Publicación 5: <i>Tracking Moisture Dynamics in a Karst Rock Formation Combining Multi-Frequency 3D GPR Data: A Strategy for Protecting the Polychrome Hall Paintings in Altamira Cave</i> - "Seguimiento de la dinámica de la humedad en una formación rocosa kárstica combinando datos de GPR 3D multifrecuencia: Una estrategia para proteger las pinturas policromas de la cueva de Altamira"	53
Publicación 6: <i>Methodology for the Monitoring and Control of the Alterations Related to Biodeterioration and Physical-Chemical Processes Produced on the Paintings on the Ceiling of the Polychrome Hall at Altamira</i> - "Metodología para el Seguimiento y Control de las Alteraciones Relacionadas con el Biodeterioro y los Procesos Físico-Químicos Producidos en las Pinturas del Techo de la Sala de Polícromos de Altamira"	54
4. Resultados y discusión	56
4.1. Evaluación estructural y dinámicas del karst	56
4.2. Dinámicas de humedad y conservación preventiva	56
4.3. Migración de pigmentos y biodeterioro	56
4.4. Integración de tecnologías y su impacto	57

4.5. Propuestas para una conservación sostenible	57
5. Conclusiones, recomendaciones y futuras líneas de investigación	58
5.1. Conclusiones	58
5.2. Recomendaciones	59
5.3. Futuras líneas de investigación	60
6. Bibliografía	63
7. Publicaciones	87
Publicación 1: Integration of Remote-Sensing Techniques for the Preventive Conservation of Paleolithic Cave Art in the Karst of the Altamira Cave	87
Publicación 2: A Multimodal Research Approach to Assessing the Karst Structural Conditions of the Ceiling of a Cave with Palaeolithic Cave Art Paintings: Polychrome Hall at Altamira Cave (Spain)	113
Publicación 3: Multisensory Analysis of the Moisture Course of the Cave of Altamira (Spain): Implications for Its Conservation	135
Publicación 4: Remote Sensing and Environmental Monitoring Analysis of Pigment Migrations in Cave of Altamira's Prehistoric Paintings	167
Publicación 5: Tracking Moisture Dynamics in a Karst Rock Formation Combining Multi-Frequency 3D GPR Data: A Strategy for Protecting the Polychrome Hall Paintings in Altamira Cave	197
Publicación 6: Methodology for the Monitoring and Control of the Alterations Related to Biodeterioration and Physical-Chemical Processes Produced on the Paintings on the Ceiling of the Polychrome Hall at Altamira	225

Lista de Figuras

Figura 1: Diagrama de flujo general del procedimiento metodológico aplicado en el estudio de la cueva de Altamira.....	31
Figura 2: Representación de las bases de la poligonal principal levantada mediante ETT, junto con los elementos radiados desde cada una de ellas.....	33
Figura 3: Integración del modelo tridimensional de la cueva con la malla de triángulos generada para la superficie exterior.....	35
Figura 4: Modelo fotogramétrico generado a partir de vuelos UAV sobre la montera de la cueva de Altamira.	36
Figura 5: Modelo fotogramétrico de la Sala de Polícromos: a la izquierda, modelo con textura aplicada; a la derecha, representación de la malla empleada en la generación del modelo general.....	37
Figura 6: Diagrama de flujo correspondiente a las campañas de seguimiento microbiológico realizadas en la Sala de Polícromos.	38
Figura 7: Sección transversal con el atributo de magnitud instantánea derivado de perfiles, que muestra las principales zonas de infiltración de agua o vías de circulación en la capa superior a la Sala de Polícromos. Se observa una fractura central que se extiende desde la zona de lapiaz (capa fisurada) hasta la superficie basal de dicha sala (indicada con línea discontinua roja). Se han marcado los sumideros superficiales que coinciden o se aproximan a la traza de los perfiles (triángulos ocre). También se indican las zonas de atenuación de la señal con la antena de 400 MHz y la correlación entre los perfiles de reflexión y las unidades estratigráficas de la capa superior.....	39
Figura 8: Vista en perspectiva de las discontinuidades que revelan zonas con mayor humedad, representadas mediante un gradiente de color azul a blanco, a través de los diferentes estratos del techo de la Sala de Polícromos. Los datos fueron obtenidos con tres antenas GPR: una de 1.6 GHz para los primeros 50 cm, una de 800 MHz para profundidades de hasta 1.2 m y otra de 300 MHz para profundidades de hasta 4.9 m.....	41
Figura 9: Visión general de los estudios realizados con GPR en la cueva de Altamira y el techo de la Sala de Polícromos: (a) malla exterior de 100 MHz con retícula de 3 × 3 m, (b) malla exterior de 400 MHz con retícula de 1 × 1 m, (c) malla exterior de 900 MHz con retícula de 1 × 1 m, (d) perfiles interiores con antenas de 400 y 900 MHz (indicados con líneas blancas), y localización del área ALT1 (cuadro rojo), (e) malla interior de 1.6 GHz con paso de 5 × 5 cm.....	42
Figura 10: Modelo fotogramétrico de alta resolución de la sala de Polícromos.....	43
Figura 11: Sección del modelo integrado y desarrollo del mismo de la cueva de Altamira, Estalactitas y la Castañera, con datos procedentes de UAV, LE3D y GPR.	44
Figura 12: Vista general del modelo 3D de las cuencas hidrográficas del techo (en rojo) de la Sala de Polícromos, mostrando flujos de agua (en azul) y puntos de goteo (en azul oscuro).....	45