

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE ÓPTICA Y OPTOMETRÍA



TESIS DOCTORAL

**Restauración fotónica virtual aplicada a patrimonio cultural:
aplicación al cuadro de Dalí "Dos figuras (1926)"**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Ángela Gómez Manzanares

Directores

Antonio Álvarez Fernández Balbuena

Daniel Vázquez Moliní

Madrid

© Ángela Gómez Manzanares, 2024

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE ÓPTICA Y OPTOMETRÍA



TESIS DOCTORAL

Restauración fotónica virtual aplicada a patrimonio cultural. Aplicación al cuadro de Dalí “Dos figuras (1926)”.

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTORA

PRESENTADA POR

Ángela Gómez Manzanares

DIRECTORES

Antonio Álvarez Fernández-Balbuena

Daniel Vázquez Moliní

Universidad Complutense de Madrid

FACULTAD DE ÓPTICA Y OPTOMETRÍA.

Programa de doctorado en Óptica, Optometría y Visión



TESIS DOCTORAL

Restauración fotónica virtual aplicada a patrimonio cultural. Aplicación al cuadro de Dalí “Dos figuras (1926)”.

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR PRESENTADA POR

Ángela Gómez Manzanares

Directores

Antonio Álvarez Fernández-Balbuena

Daniel Vázquez Moliní

Madrid, 2024

A mi abuela

Agradecimientos

Después de cuatro años de dedicación, llega el momento de reflexionar sobre lo que ha significado el proceso de elaboración de mi tesis doctoral. Ha sido un trayecto lleno de desafíos, momentos fascinantes y también difíciles; no obstante, ha sido una auténtica aventura. Todo esto ha sido posible gracias al apoyo incondicional de muchas personas que han confiado en mí, y a ellas les dedico estas palabras.

En primer lugar, quiero expresar mi profundo agradecimiento hacia mis directores de tesis. A Antonio Álvarez Fernández-Balbuena, por su gran dedicación y su compromiso con mi desarrollo académico, animándome a dar lo mejor de mí en cada etapa de este proceso. También agradezco a Daniel Vázquez Moliní por su optimismo contagioso y su dedicación incansable para garantizar el éxito de todas las investigaciones. Ambos me han transmitido un profundo amor por el conocimiento, y por ello solo tengo palabras de agradecimiento.

A Santiago Mayorga Pinilla, quien siempre ha estado disponible para ofrecer su ayuda con buenas ideas y palabras de aliento en momentos difíciles.

A Juan Carlos Martínez Antón, quien desde el principio confió en mí para iniciar mi camino en la investigación y ha sido un gran apoyo en momentos decisivos.

Quiero expresar mi reconocimiento al personal del Departamento de Conservación y Restauración del Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía. En especial a Carmen Muro, a Jorge García y a Humberto Durán, ya que sin su colaboración, esta investigación no habría sido posible.

A mis compañeros de la Facultad de Óptica y Optometría: A Agustín, a Javier, a Natalia, a Verónica Pastor, a Verónica González, a Jaime, a Asmae y a Cris Pastrana, les agradezco su compañía y apoyo durante este camino académico.

Me siento muy afortunada por tener a mis amigos y amigas. Tenerles cerca ha sido esencial para mí estos años. Gracias especialmente a Andrea Bezanilla, a

Agradecimientos

Karen, a Laura Alejo, a Andrea Salceda, a Marina, a Álvaro, a Dayana, a Ana, a Mingote, a Laura Moreno, a Pablo, a Mery, a Cris y a mi prima Paula.

Quisiera hacer una mención especial a mi tío Toño, quien lamentablemente no puede ver esta tesis terminada, pero fue la primera persona que vio en mi esta vocación y siempre me alentó a retomar mis estudios y así emprender este camino.

A mi familia, en especial a mis padres. Gracias por abrirme las puertas para que pudiera elegir el camino que quisiera apoyándome en todas mis decisiones.

Por último, gracias a Jose. Esta tesis también es un poco tuya.

Abreviaturas

a.u. Unidades arbitrarias

CCD Dispositivo de carga acoplada

CIE Comisión internacional de iluminación

CIELAB Espacio de color CIELAB

CIE31 Espacio de color CIE1931

CMOS Semiconductor complementario de óxido metálico

GRF Factor de riesgo global

H_{nm} Exposición radiante efectiva

HDR Alto rango dinámico

HSI Imagen hiperespectral

HYCAM Hypermatrixcam

IR Radiación infrarroja

ISO Organización internacional de normalización

K Constante de normalización que relaciona el flujo radiométrico con el flujo fotométrico

k_n Constante de normalización de los valores triestímulo

Abreviaturas

LCTF Filtro Sintonizable de Cristal Líquido

LED Diodo emisor de luz

LDR Bajo rango dinámico

MNCARS Museo Nacional Centro De Arte Reina Sofía

MSI Imagen multispectral

n.u. Unidades normalizadas

px Píxel

PVC Policloruro de vinilo

RMS Valor cuadrático medio

SAM Mapeador de Ángulo Espectral

SI Sistema Internacional de Unidades

SPD Distribución de potencia espectral

$S(\lambda)$ Responsividad espectral del material

UNESCO Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura

UV Radiación ultravioleta

$V(\lambda)$ Función de la eficiencia luminosa espectral fotópica

λ Longitud de onda

$\rho(\lambda)$ Reflectancia espectral

ΔE_{ab}^* Diferencia de color CIELAB

Índice general

Agradecimientos.	1
Abreviaturas.	3
Resumen.	9
Abstract.	11
1. Introducción	13
1.1. Antecedentes y motivación de la investigación.	13
1.2. Naturaleza de la luz y su propagación.	18
1.3. Visión en el ser humano	21
1.3.1. Percepción visual	21
1.3.2. El color	22
1.3.3. Colorimetría	24
1.4. Iluminación de obras de arte y el efecto fotoquímico	32
1.5. Objetivos generales y específicos	35
1.6. Estructura de la tesis	36
2. Diseño y desarrollo de un sistema de captura de imagen multiespectral de alto rango dinámico para medidas de reflectancia espectral de obras de arte	39
2.1. Diseño y prototipo de un sistema de captura de imagen multiespectral	45
2.1.1. Validación a partir de medidas de reflectancia espectral de alto rango dinámico (HDR)	48
2.1.2. Resultados	55

2.2.	Método de calibración de la uniformidad de la iluminación con aplicación en medidas de reflectancia espectral a partir de imágenes multiespectrales (MSI) e hiperespectrales (HSI).	59
2.2.1.	Método	60
2.2.2.	Configuración experimental y procedimiento de medida	60
2.2.3.	Validación del método	62
2.2.4.	Resultados	65
2.3.	Discusión	69
3.	Caracterización y segmentación de pigmentos en obras de arte a partir de medidas de reflectancia espectral de alto rango dinámico. Caso de aplicación: <i>Dos figuras (1926)</i> de Salvador Dalí.	73
3.1.	Medida de reflectancia espectral HDR de <i>Dos Figuras (1926)</i>	76
3.1.1.	Configuración experimental y procedimiento de medida	76
3.1.2.	Algoritmo para la obtención de imágenes multiespectrales HDR.	77
3.2.	Segmentación de pigmentos	79
3.2.1.	Método 1: Segmentación inversa caracterizando un área negra sin transferencia de pigmento rojizo.	79
3.2.2.	Método 2: Segmentación basada en un área con alta incidencia de pigmento rojo.	80
3.3.	Resultados	81
3.3.1.	Reflectancia espectral HDR de <i>Dos figuras (1926)</i>	81
3.3.2.	Segmentación de pigmentos a partir de medidas de reflectancia espectral HDR	82
3.4.	Discusión	90
4.	Algoritmo de optimización espectral de la iluminación para reducir el daño fotoquímico en la exposición en museos.	93
4.1.	Material y métodos	94
4.1.1.	Configuración experimental y procedimiento de medida	94
4.1.2.	Función de mérito	97
4.2.	Resultados	100
4.3.	Discusión	102

5. Restauración fotónica virtual de la pintura <i>Dos Figuras (1926)</i> de Dalí	105
5.1. Diseño de la máscara de proyección.	109
5.1.1. Segmentación de la imagen de 1926.	109
5.1.2. Calibración colorimétrica.	110
5.1.3. Calibración espacial de la proyección.	114
5.2. Resultados	116
5.2.1. Simulación	116
5.2.2. Proyección real sobre <i>Dos figuras (1926)</i>	118
5.3. Discusión	120
6. Conclusiones	123
Publicaciones generadas.	127
Lista de figuras.	130
Índice de tablas.	138
Bibliografía.	139

Resumen

La exposición de obras de arte es fundamental para nuestra sociedad, sin embargo, algunas se encuentran en un estado de deterioro avanzado imposibilitando su restauración y por lo tanto su exhibición adecuada. Además, debido al efecto fotoquímico, la radiación del espectro visible necesaria para exhibir las obras de arte daña los pigmentos y sustratos que las componen. Por lo que es necesario aplicar técnicas reversibles que permitan su exposición mejorando su apariencia disminuyendo el daño debido a dicho efecto fotoquímico para permitir una exposición más segura.

Dado que el color de un objeto depende de las características de reflectancia espectral del propio objeto, del perfil espectral que incide sobre él y de la percepción visual del observador, modificando el perfil espectral de la iluminación incidente sobre el objeto es posible alterar su apariencia. A partir de esto surge la técnica de restauración fotónica virtual, que implica proyectar sobre la obra de arte luz estructurada optimizada espectralmente para mejorar la percepción de la obra de arte a partir de las condiciones consideradas óptimas por restauradores y conservadores de museos.

En esta memoria de tesis doctoral se aplica la técnica sobre la pintura de Salvador Dalí titulada *Dos Figuras (1926)*, exhibida en el Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía. Esta pintura se encuentra en un avanzado estado de deterioro, con partes irrecuperables mediante métodos convencionales. En este estudio, se implementa la técnica de restauración fotónica virtual para recuperar las partes desprendidas y mejorar su apariencia durante la exposición. Para determinar el perfil espectral adecuado en cada punto de la pintura, es crucial caracterizarla previamente mediante reflectancia espectral, utilizando instrumentos que respeten la condición de no contacto. Las imágenes multispectrales e hiperspectrales son herramientas relevantes para esta tarea, ya que ofrecen alta resolución espacial

sin contacto directo. Sin embargo, debido a su elevado coste, en esta investigación se desarrolla un sistema ad-hoc más económico, basado en una matriz de filtros espectrales, que permite obtener la reflectancia espectral de alto rango dinámico en el rango del espectro visible con resolución espacial 4K. A partir de estas medidas, se desarrollan dos métodos de análisis de pigmentos presentes en la pintura, así como los algoritmos necesarios para dos propósitos: En primer lugar, diseñar una iluminación que permita la exposición de la obra reduciendo el daño fotoquímico sin alterar su apariencia. Y en segundo lugar, desarrollar una iluminación optimizada en cada punto de su superficie para recuperar la apariencia de las partes que ya no se aprecian.

Abstract

Exhibiting artworks is fundamental to our society; however, some are in an advanced state of deterioration, making restoration and proper exhibition impossible. Additionally, due to the photochemical effect, visible spectrum radiation necessary for exhibiting artworks damages the pigments and substrates composing them. Therefore, it is necessary to apply reversible techniques that allow for their exhibition while improving their appearance and minimizing damage caused by this photochemical effect to enable safer display.

Since an object's color depends on its own spectral reflectance characteristics, the spectral profile incident upon it, and the visual perception of the observer, modifying the spectral profile of the lighting incident upon the object can alter its appearance. Hence arises the technique of photonic virtual restoration, which involves projecting spectrally optimized structured light onto the artwork to enhance its perception based on conditions considered optimal by museum restorers and conservators. In this doctoral thesis, the technique is applied to Salvador Dalí's painting titled "Two Figures (1926)", exhibited at the Reina Sofía National Museum of Art. This painting is in an advanced state of deterioration, with parts irretrievable through conventional methods. In this study, the photonic virtual restoration technique is implemented to recover detached parts and enhance its appearance during exposure.

To determine the appropriate spectral profile at each point of the painting, it is crucial to characterize it before applying certain techniques using spectral reflectance, employing instruments that adhere to non-contact conditions. Multispectral and hyperspectral images are relevant tools for this task, offering high spatial resolution without direct contact. However, due to their high cost, this research develops a more economical ad-hoc system based on a matrix of spectral filters, allowing for high dynamic range spectral reflectance in the visible spectrum range

with 4K spatial resolution. Based on these measurements, two pigment analysis methods are developed, along with the necessary algorithms for two purposes: firstly, to design lighting that allows for the exhibition of the work while reducing photochemical damage without altering its appearance, and secondly, to develop optimized lighting at each point on its surface to recover the appearance of parts that are no longer appreciated.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes y motivación de la investigación.

El arte satisface una necesidad inherente en el ser humano, ya que dentro de su naturaleza está la necesidad de expandirse de su realidad de individuo en busca de nuevas experiencias y conocimientos más allá de la realidad individual. Entre otras cosas, el arte busca romper barreras emocionales ya que posee la habilidad de provocar emociones y despertar sentimientos que, a veces, permanecen ocultos o reprimidos en las personas.

Las obras de arte forman parte de nuestro legado cultural. Muchas de ellas son reconocidas como patrimonio cultural, y por lo tanto, son las leyes relacionadas con él las encargadas de asegurar su protección. La UNESCO se refiere al patrimonio cultural como “la herencia cultural viva de la humanidad”, y considera como tal a aquellos monumentos, conjuntos o lugares que tengan un valor universal excepcional desde el punto de vista de la historia, del arte o de la ciencia; como son obras arquitectónicas, pinturas, esculturas, estructuras arqueológicas, entre otros. El patrimonio cultural, que incluye obras de arte, se encuentra en constante peligro de deterioro debido al creciente número de factores que lo amenazan. En 1972, la UNESCO celebró la Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial Cultural y Natural, en la cual se enfatizó la importancia del desarrollo de métodos científicos para la preservación del patrimonio cultural frente a las adversidades [1].

La Unión Europea ha establecido diversos programas y estrategias para fomentar el uso de tecnologías emergentes. Entre ellas se encuentran la Estrategia 21 [2], el grupo 2 del plan Horizonte Europa 2025-27 [3] y el Faro Action Plan [4]. Estas iniciativas comparten el objetivo común de promover la digitalización del patrimonio cultural. La digitalización de obras de arte con fines de conservación es una de las principales acciones, permitiendo la creación de copias digitales duraderas ante el deterioro o daño de los originales. Además, se promueve el uso de tecnologías como la realidad virtual, la inteligencia artificial y la visualización en 3D para enriquecer la interacción con el patrimonio cultural con fines educativos o para favorecer y fomentar el turismo cultural. Estas estrategias también generan convocatorias que proporcionan financiación para desarrollar la investigación relacionada con la conservación del patrimonio cultural.

En este sentido, los museos son instituciones fundamentales para nuestra sociedad, pues se encargan de la doble tarea de exhibir y preservar el arte y los objetos de patrimonio cultural. Por un lado, la exhibición es esencial para que pueda ser apreciado. Dado que es una forma de expresión del artista, desde un punto de vista semántico, toda forma de expresión requiere de un receptor que interactúe con ella para que se pueda llevar a cabo la transmisión de emociones y conocimiento entre el artista y su público. Por otra parte, al igual que el resto de objetos y seres vivos, las obras de arte están sujetas a la degradación; y los conservadores y restauradores desempeñan un rol de vital importancia en este sentido, pues trabajan en su preservación en la medida de lo posible asegurando que continúen enriqueciéndonos con aquello que un día, un artista, quiso transmitir.

De entre los diferentes artistas que han dejado huella en la historia de la humanidad, Salvador Dalí fue uno de los más importantes del surrealismo, uno de los movimientos artísticos más impactantes del siglo XX, por lo que todo su legado artístico merece ser preservado y exhibido.

La pintura *Dos figuras (1926, MNCARS)* no es de las más importantes de su carrera, sin embargo, fue desarrollada en un año clave para la vida del artista y por lo tanto, también para su obra (Figura 1.1). En 1926 es expulsado definitivamente de la Escuela de Bellas Artes de Madrid y viaja a París para visitar el Louvre, el Museo Grévin y Versalles. Además, es en la visita a París donde Dalí conoce a Picasso. El cubismo de Picasso fue de gran influencia para el artista, y se ve reflejado tanto en *Dos figuras* como en otras obras de la época [5, 6].



Figura 1.1: Imagen del cuadro en 2019. Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía (MNCARS).

En esta época, el artista realizó otras obras que comparten características importantes con *Dos figuras*, como es *El Arlequín* (1926-27, Madrid, MNCARS), *La maniquí* (1926-27, colección particular) y *Naturaleza muerta al claro de luna* (1927, colección particular). En ellas se aprecia la influencia de las dos corrientes artísticas que habitualmente se consideran opuestas, como son el surrealismo y el cubismo. La influencia del cubismo se aprecia con las formas superpuestas, y, por otro lado, se aprecia el carácter onírico del surrealismo [7]. Teniendo en cuenta la relación ya conocida que mantenía Dalí con Federico García Lorca, es relevante mencionar al escritor para entender la obra de Dalí y concretamente, *Dos figuras*. Se puede decir que esta época, entre 1926 y 1927, es la época lorquiana de Dalí, pues su presencia se ve reflejada en todas las obras realizadas por el artista. En *Dos figuras*, una de las figuras representa a Lorca, que teniendo en cuenta la posición con la figura de mayor tamaño que representa a Dalí, se entiende entre ambos un

vinculo afectivo. En el libro de Dalí titulado “*La vida secreta de Dalí*” el artista se refiere a esta época como “La sombra de Maldoror se cernía sobre mi vida, y fue precisamente en ese periodo cuando, por la duración de un eclipse otra sombra, la de Federico García Lorca, vino a oscurecer la virginal originalidad de mi espíritu y de mi carne” [8]. Sin embargo, tal y como indica Valeriano Bozal en su libro, quizá sea mas conveniente indicar que Lorca ayudó al artista a estimular su creatividad abriéndole las puertas al surrealismo [7].

El paso del tiempo ha ejercido lamentablemente un impacto perjudicial sobre *Dos figuras (1926)* causando su deterioro y provocando que se encuentre en un estado de fragilidad tal que imposibilita que pueda ser intervenida para su restauración. De entre los diferentes cambios, se observa la presencia de un pigmento rojizo proveniente de la transferencia de pigmento con otras obras de arte. Asimismo, ciertas áreas muestran oscurecimiento debido a la transparencia de los pigmentos blancos utilizados, mientras que otros se han aclarado, y se han perdido líneas estaban presentes en la obra, como se muestra en fotografía de 1926 (Figura 1.2). Exponer tanto *Dos figuras (1926)* como el resto de obras de arte es esencial para que a día de hoy la sociedad pueda seguir enriqueciéndose con su obra y continúe dialogando con los futuros artistas.

Desde el punto de vista de la conservación, surge un desafío vinculado a la exposición segura de obras de arte, ya que la radiación del espectro visible necesaria para exhibirlas conlleva un deterioro debido al daño fotoquímico. Cuando un objeto es iluminado, una parte de la radiación es absorbida por el objeto, otra parte es reflejada hacia el observador y otra es transmitida a través del objeto. En el caso de pinturas sobre lienzo, la transmisión de radiación es prácticamente nula; por lo tanto, la mayor parte de la radiación que no es reflejada por el objeto es absorbida. La absorción de radiación por parte de las moléculas conlleva cambios en sus propiedades químicas, lo que da lugar al efecto fotoquímico. Posteriormente, en la sección 1.4 de esta tesis, se explicará en detalle este fenómeno, pero es importante indicar que altera las propiedades químicas de los materiales, produciendo cambio de color y pérdida de sus propiedades fisicoquímicas, creando grietas y aumentando su fragilidad [9, 10].

En el campo del diseño de iluminación de obras de arte, se han llevado a cabo investigaciones con el propósito de diseñar una iluminación espectralmente optimizada que consiga reducir la radiación absorbida por las obras de arte. A



Figura 1.2: Imagen facilitada por la Fundación Gala - Salvador Dalí, donde aparece Salvador Dalí en 1926 posando junto a *Dos figuras*.

partir de la reducción de aquellas longitudes de onda que el objeto absorbe en cada punto, se consigue reducir el daño fotoquímico sin variar su apariencia con respecto a la iluminación de amplio espectro (luz blanca), típicamente utilizada en museos. Sin embargo, este tipo de fuentes de luz muestran la obra de arte en su estado actual, y dependiendo de su grado de deterioro puede llevar a una percepción errónea de la misma. De este modo, se plantea la posibilidad de llevar la optimización espectral de la iluminación un paso más allá. Dado que es viable optimizar el perfil espectral de la iluminación sobre cada punto de la obra de arte, ¿y si además de reducir el daño fotoquímico sobre su superficie se pudiera mejorar su apariencia? Respondiendo a esta pregunta surgió la técnica de restauración fotónica virtual.

La percepción del color de los objetos depende principalmente de tres factores: La iluminación que incide sobre el objeto, las propiedades intrínsecas del mismo tal y como la reflectancia espectral, y la respuesta visual del observador con respecto a las características espectrales de la luz reflejada desde el objeto y su entorno. Al variar alguno de estos factores, como el ángulo con el que se ilumina el objeto o el

perfil espectral de la fuente de luz, es posible modificar la percepción del objeto, creando texturas sobre él o alterando su color. Estos aspectos permiten alterar de forma reversible la apariencia de obras de arte, ya que es factible diseñar una iluminación óptima que realce su apariencia original o algún otro hecho que los restauradores y responsables del museo consideren importante. Al optimizar el perfil espectral de la iluminación es posible diseñar una fuente de luz que además de mejorar la apariencia de la obra de arte en cada punto de su superficie, reduzca el daño fotoquímico con respecto al producido por las fuentes de luz usadas habitualmente en los museos y exposiciones, ya que se estudian y optimizan la selección de aquellas longitudes de onda que no influyen decisivamente en la apariencia de la obra de arte.

La técnica de restauración fotónica virtual no solo beneficia a la exposición de las obras de arte en museos de forma más segura para estas, si no que además supone una valiosa herramienta para restauradores y conservadores. Esta técnica les proporciona la capacidad de visualizar cómo quedaría la obra de arte en su estado original antes de intervenir sobre ella facilitando la correcta toma de decisiones.

Debido al estado avanzado de deterioro en el que se encuentra la pintura *Dos figuras*, los responsables de la obra en el MNCARS consideran que no es posible recuperar su apariencia original utilizando los métodos de restauración convencionales. Por ello, en el desarrollo de esta tesis doctoral se implementará la técnica de restauración fotónica virtual sobre la pintura con el propósito de demostrar la viabilidad de recuperar su aspecto de manera reversible a partir de una iluminación optimizada espectralmente punto por punto [11]. Esta técnica no solo mejorará la apariencia de la obra de arte si no que además reducirá el futuro daño fotoquímico sobre su superficie en comparación con la iluminación del iluminante estándar D65 establecido por la CIE.

1.2. Naturaleza de la luz y su propagación.

La naturaleza y propagación de la luz ha sido objeto de estudio y reflexión para los científicos y filósofos a lo largo de los siglos. Inicialmente se creía que la propagación de la luz era en línea recta, mediante rayos. Sin embargo, en el siglo XVII fue Isaac Newton quien introdujo la idea de que la luz podría consistir en un conjunto de partículas, llamadas corpúsculos, que también se propagaban en línea

recta. Este descubrimiento se llevo a cabo a partir de la visualización de los anillos de Newton. En este experimento, Newton colocó una lente convexa sobre una lente plana y visualizó unos anillos de colores que indicaban una cierta periodicidad en el comportamiento de la luz. Este fenómeno fue justificado a partir de la teoría corpuscular, argumentando que la luz se componía de corpúsculos que parte de ellos penetraban en el material y parte se reflejaban creando patrones de interferencia. Los corpúsculos interactuaban entre si creando patrones de interferencia [12].

La teoría corpuscular de Newton fue rebatida posteriormente en el s. XVIII por Thomas Young y Augustin-Jean Fresnel, quienes, con sus experimentos, introdujeron la teoría ondulatoria de la luz. Un importante acontecimiento para el conocimiento de la naturaleza de la luz fue cuando en el año 1801, Thomas Young realizó su famoso experimento de la doble rendija. Este experimento demostró la teoría ondulatoria de la luz revelando el fenómeno de la difracción que explicaba de manera más precisa comportamientos de la luz observados en el fenómeno de la interferencia. La teoría corpuscular de Newton no podía explicar la observación de interferencias al atravesar la luz dos rendijas, lo que fortaleció la aceptación de la teoría ondulatoria.

La última aportación sobre la naturaleza ondulatoria de la luz la hizo James Clerk Maxwell en 1855 con el desarrollo de sus ecuaciones sobre el electromagnetismo. Estas ecuaciones predijeron que la luz es una onda electromagnética, unificando las teorías conocidas sobre electricidad y magnetismo. Esto supuso una gran revolución sobre la comprensión de la naturaleza de la luz y su relación con la electricidad y el magnetismo [13].

Cuando se creía que el debate sobre si la naturaleza y la propagación de la luz era de tipo ondulatorio o corpuscular estaba resuelto, surgió la necesidad de justificar el efecto fotoeléctrico, un fenómeno que la teoría ondulatoria no podía explicar pero que podía ser fácilmente explicado a través de la teoría corpuscular, reviviendo así la teoría de Newton [12]. Así, a principios del siglo XX, surgió la ley de Planck, quien, junto a Einstein, propuso el concepto de fotones, pequeños paquetes donde se concentra la energía de las ondas electromagnéticas, definiendo la energía del fotón E como:

$$E = \frac{h c}{\lambda}, \quad (1.1)$$

donde h es la constante de Planck que tiene un valor de $6.63 \cdot 10^{-34} Js$, c es la velo-

cidad de la luz en el vacío, cuyo valor es $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ y, por último, λ hace referencia a la longitud de onda. De este modo, Planck determinó que la energía de cada tren de ondas es directamente proporcional a la frecuencia de la radiación electromagnética y, por ende, inversamente proporcional a su longitud de onda. Esto implicaba que diferentes frecuencias de luz llevaban asociadas distintas cantidades de energía [12].

El conjunto de todas las ondas electromagnéticas a diferentes longitudes de onda forma el espectro electromagnético que abarca desde ondas electromagnéticas con longitudes de onda muy corta como son los rayos γ , hasta ondas de longitud de onda más larga, como son las ondas de radio. Y, por lo tanto, de acuerdo con la ley de Planck, las ondas electromagnéticas con longitud de onda más corta inciden sobre las superficies con mayor energía.

El ser humano no es capaz de detectar todas las ondas electromagnéticas. A través de las diferentes estructuras que componen el sistema visual en los humanos se pueden detectar ondas electromagnéticas comprendidas entre aproximadamente 380 y 750 nanómetros, medidas en el vacío (Figura 1.3). Este rango del espectro electromagnético se denomina espectro visible y las ondas electromagnéticas pertenecientes a este rango espectral son las encargadas de formar el fenómeno de la visión.

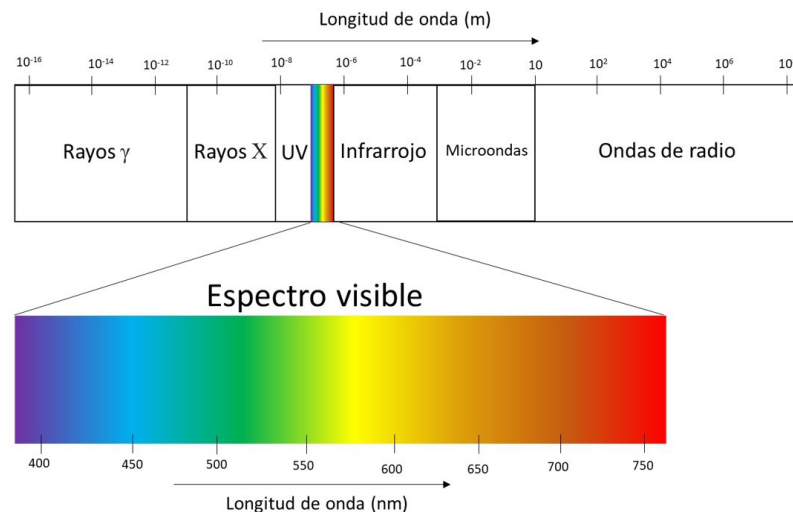


Figura 1.3: Espectro electromagnético

1.3. Visión en el ser humano

1.3.1. Percepción visual

Al incidir sobre el ojo humano, la luz atraviesa los medios oculares, incluyendo la córnea, el humor acuoso, el cristalino y el cuerpo vítreo, antes de alcanzar la retina (Figura 1.4). En la retina, se forma una imagen sobre una capa de células conocidas como fotorreceptores. Estos fotorreceptores se dividen en dos tipos: los conos y los bastones. Mientras los conos requieren una luminancia relativamente alta para activarse, los bastones responden incluso cuando un solo fotón incide sobre ellos. No obstante, los conos disponen de mecanismos para evitar la saturación incluso en condiciones de deslumbramiento, mientras que los bastones se saturan en entornos de baja iluminación. Esto hace que los conos sean las células indicadas para llevar a cabo el fenómeno de la visión en condiciones de iluminación altas, es decir, condiciones fotópicas; y los bastones, las células indicadas para proporcionar visión en condiciones de iluminación bajas, es decir, condiciones escotópicas [14].

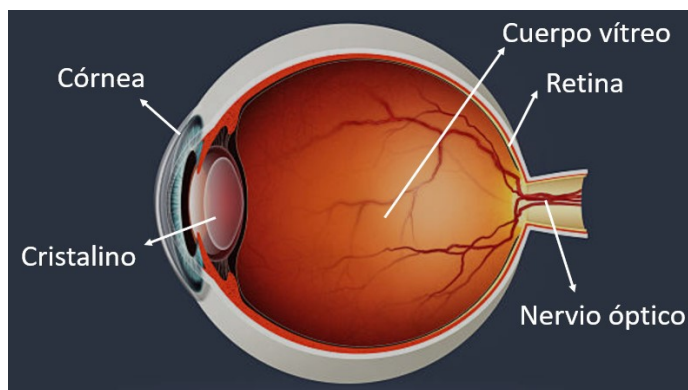


Figura 1.4: Representación esquemática de las partes del ojo humano.

La imagen que se forma en la retina se encuentra en su área central, conocida como la foveola y abarca 1° desde el centro de la retina, seguida por la fóvea en un rango de hasta 5° y finalmente, la mácula en un área que se extiende hasta aproximadamente 20° . La distribución de conos y bastones en la retina no es uniforme, ya que los bastones están ausentes en la zona de la fóvea y comienzan a estar presentes a partir de aproximadamente 20° [14]. A parte de su morfología y su distribución en la retina, los conos y los bastones se diferencian entre sí por

el pigmento que los componen. Mientras que los bastones contienen rodopsina, los conos están compuestos por tres tipos distintos de pigmentos: S, M y L. Estos pigmentos determinan su sensibilidad a longitudes de onda baja, media y alta dentro del espectro visible, respectivamente (Figura 1.5) [14].

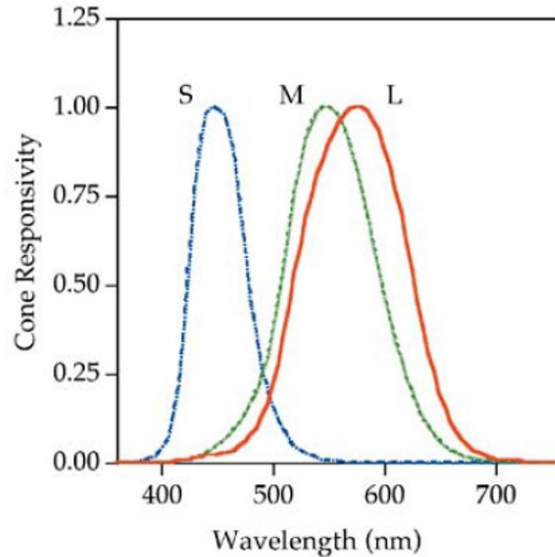


Figura 1.5: Responsividades espectrales de los conos L, M y S. [15].

Una vez la luz incide sobre los fotorreceptoras, la información de estos se transfiere a las células bipolares en la retina directamente desde los fotorreceptores o a través de las células horizontales. Y a continuación, dicha información es transmitida a las células ganglionares, también directamente desde las células bipolares o a partir de las células amacrinas. La comprensión total de las funciones de cada célula sigue siendo un desafío, pero es relevante destacar que cada una desempeña una función en el procesamiento de la información visual [15]. Finalmente, a partir de las células ganglionares, la información es transmitida a la corteza estriada del cerebro a través del nervio óptico culminando así el fenómeno de la visión.

1.3.2. El color

Cuando la luz ilumina un objeto, una parte de la radiación incidente es absorbida, otra parte es transmitida en el caso de objetos transparentes o translúcidos, y

otra parte es reflejada. La luz reflejada es la combinación de la reflectancia del propio objeto en determinadas direcciones y de la iluminación incidente [16]. Cuando la luz reflejada, tanto del objeto como del entorno, incide en el sistema visual, es percibida por el ojo humano, creando la percepción del color [17]. Por lo tanto, se puede decir que el color de un objeto depende de la iluminación que incide sobre el objeto, de la capacidad para reflejar la iluminación de dicho objeto, es decir, de su reflectancia espectral y, por supuesto, de la respuesta espectral del observador (Figura 1.6).

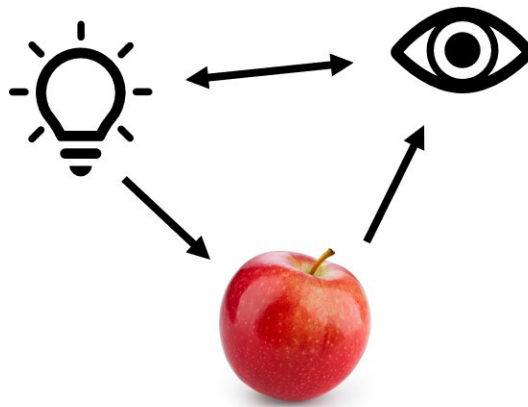


Figura 1.6: Representación gráfica que muestra cómo el fenómeno de la visión surge de la interacción entre las fuentes de luz, los objetos y el sistema visual humano.

La variación de alguno de estos tres factores afecta directamente a la percepción del color de un objeto. Es decir, los parámetros asociados a la iluminación como son su intensidad, perfil espectral o ángulo de incidencia sobre el objeto, influyen en la percepción del color. Ocurre lo mismo en el observador, como se ha visto en la sección anterior, los procesos neuronales son complejos y no todos los observadores perciben el color del mismo modo, luego hacer objetiva la medida del color no es una tarea sencilla.

1.3.3. Colorimetría

Comisión Internacional de Iluminación (CIE). Iluminantes estándar

La Comisión Internacional de Iluminación (*CIE*, por sus siglas en inglés) tiene como objetivo establecer las condiciones de iluminación óptimas en función del entorno del objeto iluminado y atendiendo a sus condiciones colorimétricas. Para ello, define una serie de iluminantes con perfiles espectrales estándar que simulan diferentes condiciones lumínicas y permiten proporcionar referencias consistentes para la medición del color (Figura 1.7). De entre ellos cabe destacar el iluminante D50, D65 y A.

- **Iluminante D50 y D65:** Ambos iluminantes representan la luz diurna, siendo el iluminante D50 con una temperatura de color de 5003 K y el iluminante D65 con una temperatura de color de 6504 K.
- **Iluminante A:** Representa la iluminación incandescente con una temperatura de color de 2856 K.

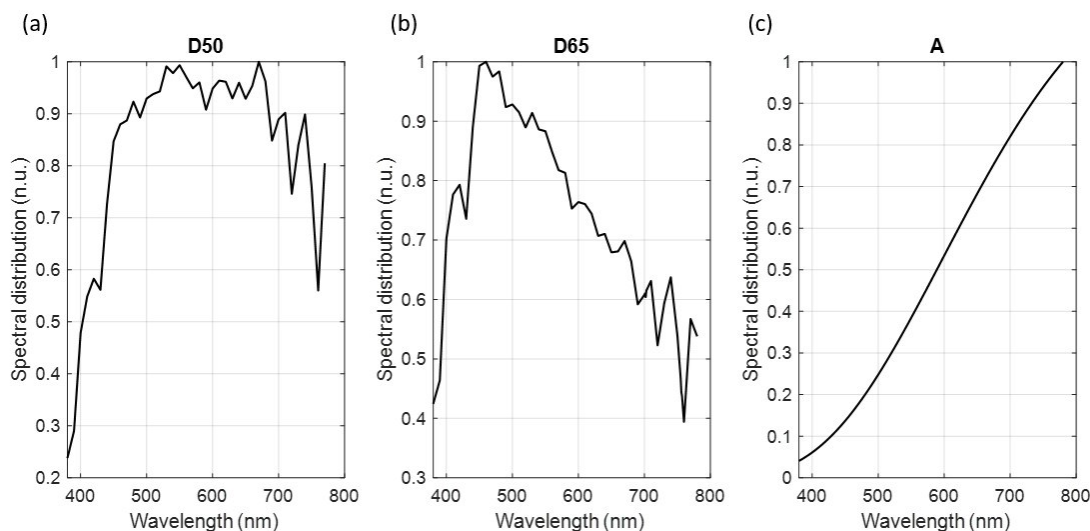


Figura 1.7: Distribución espectral normalizada del iluminante D50 (a), del iluminante D65 (b) y del iluminante A (c).

Radiometría y fotometría.

La radiación electromagnética puede ser analizada desde dos perspectivas distintas: la radiométrica y la fotométrica. La radiometría considera la radiación electromagnética sin tener en cuenta cómo es percibida por el ojo humano, mientras que la fotometría tiene en cuenta la respuesta del ojo humano a las diferentes longitudes de onda. La energía de la radiación electromagnética en términos radiométricos se define a partir del flujo radiante ϕ_e [18, 19]. Se mide en vatios y se puede calcular mediante la relación entre la energía radiante por unidad de tiempo,

$$\phi_e = \frac{dQ}{dt}. \quad (1.2)$$

A partir del concepto de flujo radiante surge la necesidad de definir otros términos necesarios para cuantificar la radiación electromagnética. Estos conceptos son la irradiancia, la radiancia y la intensidad.

El flujo radiante por unidad de ángulo sólido sr es la intensidad radiante I_e W/sr (vatios por estereorradián),

$$I_e = \frac{d\phi_e}{d\Omega}. \quad (1.3)$$

La cantidad de flujo radiante por unidad de superficie es la irradiancia, W/m^2 (vatios por metro cuadrado),

$$E_e = \frac{d\phi_e}{dS}. \quad (1.4)$$

La radiancia L_e se mide en unidades de W/m^2sr (vatios por metro cuadrado por estereorradián) y corresponde al flujo radiante emitido por cada unidad de área S de la fuente de iluminación y por cada unidad de ángulo sólido Ω en una dirección determinada definida por el ángulo θ . Se expresa como:

$$L_e = \frac{d\phi_e}{d\Omega dS \cos(\theta)}. \quad (1.5)$$

Para obtener la energía fotométrica a partir de la radiométrica es necesario definir una función que refleje cómo se perciben los diferentes niveles de luminosidad en las diferentes longitudes de onda. Para ello, en 1924, la CIE estableció la curva que representa la función de la eficiencia luminosa espectral fotópica $V(\lambda)$

(Figura 1.8), la cual indica una alta sensibilidad en torno a los 555 nm y una menor sensibilidad hacia los extremos del espectro visible.

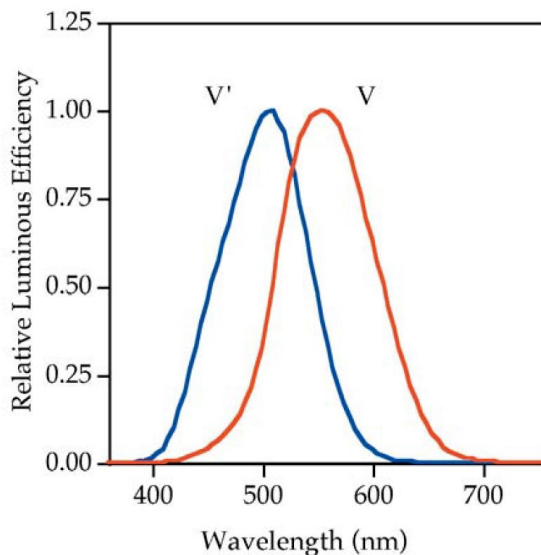


Figura 1.8: Curva de sensibilidad espectral del ojo humano en condiciones de visión fotópica $V(\lambda)$ y escotópica $V'(\lambda)$ [15].

Al realizar la integral del flujo radiante ponderado por la función $V(\lambda)$, se calcula el flujo luminoso ϕ_v que se mide en lúmenes (lm) y representa la cantidad total de energía radiante ajustada según la sensibilidad del ojo humano a diferentes longitudes de onda,

$$\phi_v = K \int_{380}^{780} \phi_e V(\lambda) d\lambda, \quad (1.6)$$

donde K es una constante de normalización cuyo valor es 683 lm/W necesaria para poder obtener las unidades adecuadas.

De entre los conceptos fotométricos más destacables están la intensidad luminosa, la iluminancia y la luminancia que equivalen a la intensidad radiante, la irradiancia y la radiancia en términos radiométricos, respectivamente.

La intensidad luminosa I_v se mide en candelas (cd) y es el flujo luminoso emitido ϕ_v por unidad de ángulo sólido Ω ,

$$I_v = \frac{d\phi_v}{d\Omega}. \quad (1.7)$$

La iluminancia E_v se mide en *lux* y hace referencia a la cantidad de flujo fotométrico ϕ_v por unidad superficie S ,

$$E_v = \frac{d\phi_v}{dS}. \quad (1.8)$$

La luminancia L_v se expresa en cd/m^2 y es el flujo luminoso emitido ϕ_v por unidad de área S de la fuente de iluminación y por unidad de ángulo sólido Ω en una dirección determinada por el ángulo θ ,

$$L_v = \frac{d\phi_v}{d\Omega dS \cos(\theta)}. \quad (1.9)$$

Respuesta visual humana. Funciones estándar de igualación del color.

Para definir cuantitativamente el color es necesario tener en cuenta el fenómeno del metamerismo, donde dos colores con diferentes perfiles espectrales pueden ser identificados como idénticos por el observador [14]. Surgió así la necesidad de definir un observador estándar que considerara el metamerismo y proporcionara información sobre la percepción humana de los colores. En 1931, la CIE realizó un experimento de igualación del color en el que solicitó a un grupo de observadores que igualaran colores mediante la selección de colores primarios RGB proyectados según la información espectral. Por ejemplo, para un color C dado, se determinó $\mathcal{R}\mathcal{G}\mathcal{B}$ que es la cantidad de colores primarios RGB necesarios para igualarlo,

$$C \equiv R(\mathcal{R}) + G(\mathcal{G}) + B(\mathcal{B}). \quad (1.10)$$

Este procedimiento permitió la mezcla aditiva, conforme a las leyes de Grassmann. Estas leyes establecen que, al combinar iluminaciones con perfiles espectrales distintos, el color resultante es la suma de las contribuciones individuales de cada color.

A partir de los resultados obtenidos, se generaron las funciones de igualación del color ($\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ y $\bar{b}(\lambda)$) representadas en la figura 1.9a. Sin embargo, estos valores mostraron la necesidad de añadir valores negativos de $\bar{r}(\lambda)$ para igualar determinados colores, lo cual es impracticable. Para solventar este problema, la CIE realizó una modificación de estas funciones definiendo unos nuevos valores primarios de los que partir, a los cuales se les llamó primarios virtuales y se les designó con las letras XYZ (valores triestímulo). Estos valores también fueron

definidos de forma que X y Z dieran como resultado siempre que Y , que es la luminancia, fuera $V(\lambda)$ para que definiera únicamente la luminosidad del color y que no se obtuvieran valores negativos.

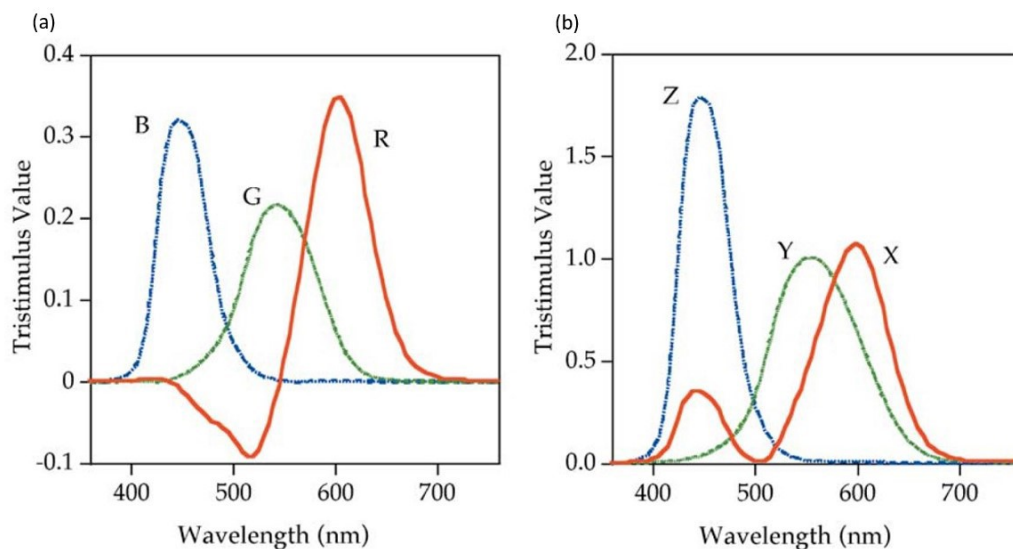


Figura 1.9: Representación de las funciones de igualación del color del observador colorimétrico estándar 2° CIE 1931 para los valores de colores primarios RGB (a) y XYZ (b) [15].

De este modo, se generaron las curvas de igualación del color para el observador estándar 2° ($\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ y $\bar{z}(\lambda)$) que actualmente se utilizan para la caracterización del color y que se utilizarán en las investigaciones mostradas en esta tesis doctoral (Figura 1.9b).

Valores triestímulo y representación del color

Los valores triestímulo XYZ permiten reproducir el color de un estímulo reflejado sobre un objeto con distribución espectral de potencia $\phi(\lambda)$ y detectado por un sensor, a través de las funciones de igualación del color de un observador estándar de la CIE. Estos valores XYZ se obtienen de la siguiente manera:

$$X = k_n \int_{\lambda} \phi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, \quad (1.11)$$

$$Y = k_n \int_{\lambda} \phi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \quad (1.12)$$

$$Z = k_n \int_{\lambda} \phi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda. \quad (1.13)$$

donde $\phi(\lambda)$ se obtiene a partir del producto entre la reflectancia del objeto $\rho(\lambda)$ y el perfil espectral $E(\lambda)$ de la fuente de iluminación que incide sobre él,

$$\phi(\lambda) = E(\lambda)\rho(\lambda). \quad (1.14)$$

La constante k_n logra que el valor triestímulo Y sea 100 para un objeto cuyo valor de reflectancia o transmitancia espectral sea 1 en el espectro visible [20].

$$k_n = \frac{100}{\int_{\lambda} E(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}. \quad (1.15)$$

En 1931, la CIE desarrolló el diagrama cromático CIE31 con el fin de representar bidimensionalmente los valores triestímulo XYZ eliminando en dicha representación la información de la luminancia (Figura 1.10).

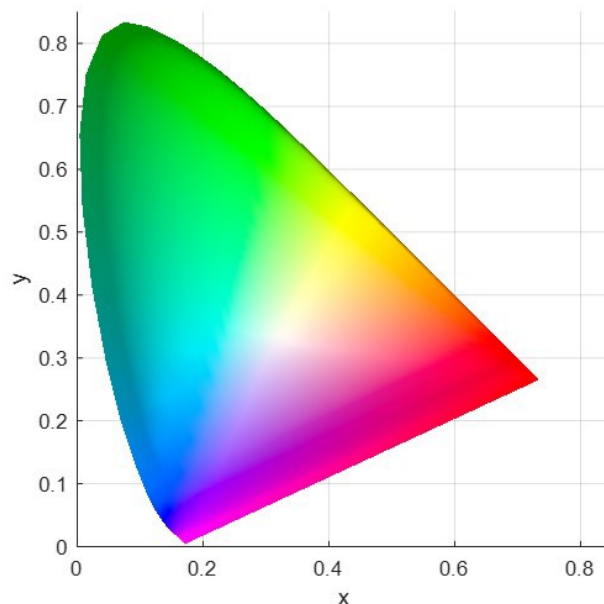


Figura 1.10: Diagrama cromático CIE 1931.

La representación del color en el diagrama cromático se lleva a cabo a partir de las coordenadas cromáticas x , y y z obtenidas de los valores triestímulo XYZ ,

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, \quad (1.16)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}, \quad (1.17)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}. \quad (1.18)$$

La suma de las tres coordenadas $x + y + z = 1$, por lo tanto z puede obtenerse a partir de las otras dos. Sin embargo, dado que se trata de una representación bidimensional se suele prescindir de ella.

Espacio de color CIELAB.

La necesidad de definir el color tridimensionalmente ha dado origen a la creación de los espacios de color. A partir de ellos es posible llevar a cabo una representación más completa y precisa del color. En esta memoria de tesis doctoral, se utilizará el espacio de color CIELAB para aquellas secciones en las que las investigaciones mostradas requieran la caracterización colorimétrica.

El espacio de color CIELAB permite la caracterización cromática a partir de los tres parámetros L^* , a^* y b^* . El parámetro L^* representa la claridad del color de un objeto o superficie con la que el ser humano lo percibe, a^* la tonalidad rojo-verde y b^* la tonalidad amarillo-azul (Figura 1.11).

Los parámetros L^* , a^* y b^* se obtienen del siguiente modo:

$$L^* = 116\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3} - 16, \quad (1.19)$$

$$a^* = 500\left[\left(\frac{X}{X_n}\right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3}\right], \quad (1.20)$$

$$b^* = 200\left[\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_n}\right)^{1/3}\right], \quad (1.21)$$

donde X , Y y Z son los valores triestímulo y X_n , Y_n y Z_n son los valores triestímulo de un blanco de referencia. Para calcular X_n , Y_n y Z_n se asume que $\phi(\lambda)$ es igual

a $E(\lambda)$ y que por tanto el valor de reflectancia de la muestra blanca tomada como referencia es del 100 %.

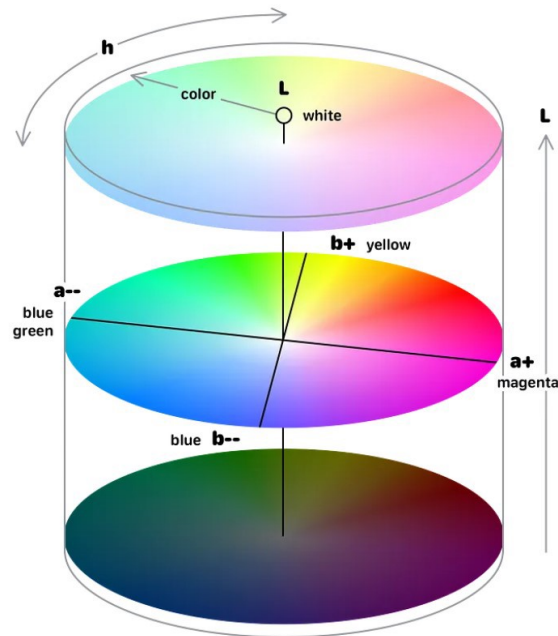


Figura 1.11: Esquema del espacio de color CIELAB. (<https://vkteam.medium.com/android-the-evolution-of-the-photo-editor-f646e604c559>)

La diferencia de color ΔE_{ab}^* entre dos estimulo estímulos colorimétricos del mismo tamaño y forma, se calcula a partir de la distancia eucladiana entre sus parámetros L^* , a^* y b^* ,

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L_1^* - L_o^*)^2 + (a_1^* - a_o^*)^2 + (b_1^* - b_o^*)^2} \quad (1.22)$$

Para determinar el umbral de percepción humana para el valor de ΔE_{ab}^* , se han realizado múltiples investigaciones utilizando diversas pruebas con distintos materiales. Los resultados de estos experimentos muestran valores de ΔE_{ab}^* que varían desde 1.02 hasta 3 en función de las condiciones de iluminación y el tipo de muestra utilizada [21, 16].

1.4. Iluminación de obras de arte y el efecto fotoquímico

Las obras de arte deben ser expuestas para su apreciación y disfrute. Sin embargo, condiciones inadecuadas de temperatura e iluminación durante su exposición contribuyen a su deterioro [22, 10, 23]. El daño causado por la emisión de radiación UV e IR es controlado por filtros o fuentes de LED, pero la radiación emitida por el rango visible del espectro electromagnético es necesaria para la apreciación de la obra de arte y al mismo tiempo podría producir daños irreparables en ella [24]. La CIE diferencia entre el daño causado por el efecto fotoquímico en diferentes pigmentos y el daño debido a la acción térmica de la luz [25]. La absorción de radiación por parte de las moléculas conlleva cambios en sus propiedades químicas, lo que da lugar al efecto fotoquímico. Este fenómeno altera las propiedades químicas de los materiales, produciendo cambio de color y pérdida de dureza de los materiales creando grietas y aumentando su fragilidad [9]. El daño fotoquímico depende de la irradiancia sobre el objeto, de la duración de la exposición, de la distribución de la energía espectral de la radiación incidente (SPD) y del espectro de acción del material receptor [9].

El daño causado por la acción térmica ocurre cuando la temperatura de la superficie de un objeto iluminado aumenta por encima de la temperatura ambiente, y es proporcional a la irradiancia sobre su superficie. Según la CIE, ha sido más ignorado en los museos, ya que el daño no ha sido tan visible como en el caso del daño por acción fotoquímica. Sin embargo, al aumentar la temperatura de una superficie se favorece la acción química en su composición [25]. A medida que el control del daño fotoquímico en los museos ha ganado importancia, también lo ha hecho el control del daño por la acción térmica de la luz, teniendo en cuenta que un aumento en la temperatura favorece la acción química a nivel molecular en los diferentes pigmentos. Con el fin de controlar y garantizar una exposición más segura de las obras de arte en los museos, en el año 2004 la CIE publicó la norma CIE “Control del daño causado a los objetos expuestos en museos debido a la radiación óptica” [25]. Entre su contenido, recoge los cuatro métodos más relevantes para la estimación de la sensibilidad de los diferentes materiales a la radiación visible y así poder prevenir el daño causado en la exposición.

Los métodos incluidos son la escala Blue Wool, el espacio de color CIELAB,

descrito en la sección anterior, el método basado en la identificación de respuestas de los colorantes a la exposición a través de su concentración, y el modelo de Berlín. La representación colorimétrica en el espacio de color CIELAB permite la caracterización cromática de los pigmentos y sustratos que componen una obra de arte y es ampliamente utilizado para calcular la diferencia de color entre dos pigmentos y así analizar su deterioro a lo largo del tiempo.

La escala Blue Wool

La escala Blue Wool se utiliza para evaluar la sensibilidad de los materiales en función de la decoloración que sufren debido al daño fotoquímico. Esta escala establece ocho categorías ISO para caracterizar dicha decoloración, siendo ISO 1 el material más sensible a la luz e ISO 8 el menos sensible.

Respuesta de los colorantes a la exposición

El modelo basado en la identificación de respuestas de los colorantes a la exposición fue desarrollado en 1968 por Feller [25]. En su investigación se observó que la degradación de los colorantes debido a la radiación visible se podía explicar a partir de la ecuación del comportamiento químico de los materiales de primer orden cinético. Siendo de este modo proporcional al logaritmo natural de la concentración del colorante,

$$\ln C_t = \ln C_o + k_1 t, \quad (1.23)$$

donde C_o es la concentración de colorante inicial C_t es la concentración de colorante después de un tiempo t y k_1 es una constante.

Modelo de Berlín

El modelo de Berlín es el método más utilizado entre los descritos en la norma. Esto es debido a que tiene en cuenta tanto la respuesta espectral específica de cada tipo de material $S(\lambda)$, como la irradiancia y el perfil espectral de la radiación responsable del daño fotoquímico E_{dm} . También considera la evolución de este daño a lo largo del tiempo de exposición t . De este modo, se expresa la función de

daño obtenida a partir del modelo de Berlín,

$$DM = f(E_{dm}, S(\lambda), t), \quad (1.24)$$

Al considerar E_{dm} en la ecuación hace que se tenga en cuenta al analizar el daño fotoquímico que la radiación óptica ejerce más o menos daño sobre los materiales en función de la longitud de onda de emisión. Las longitudes de onda más cortas generan un daño distinto en comparación con las más largas. El tiempo es considerado puesto que la influencia del daño fotoquímico sobre los materiales no es lineal; la misma radiación puede generar mayor daño en un periodo breve y mantener dicho efecto sobre el material en un periodo temporal prolongado. La evolución de E_{dm} a lo largo del tiempo t crean el concepto de Exposición Radiante Efectiva H_{dm} , cuyas unidades son Wh/m^2 . La unidad de medida del tiempo es la hora (h), aunque no sea la unidad estándar del Sistema Internacional de Unidades (SI) para medir el tiempo. Matemáticamente se expresa del siguiente modo:

$$H_{dm} = \int_t E_{dm} dt. \quad (1.25)$$

En función del material irradiado, será necesaria una cantidad de H_{dm} para generar una unidad de ΔE_{ab} que conlleve un cambio de color perceptible para el ojo humano. Por otro lado, como se ha mencionado anteriormente, los efectos del daño fotoquímico varían entre los diferentes materiales [10]. De esta manera, el modelo de Berlín introduce el concepto de Responsividad Espectral Relativa, representada como $S(\lambda)$. En el modelo de Berlín se estudió el comportamiento de diferentes materiales a niveles de radiación controlados y estos estudios permitieron agrupar los materiales en diferentes grupos en función de dicho comportamiento. Como resultado de este análisis se pudo asociar la forma de $S(\lambda)$ a una función exponencial, la cual está normalizada para no contemplar la radiación por debajo de 300 nm ya que está controlada en las iluminaciones utilizadas en los museos. Matemáticamente se expresa del siguiente modo:

$$S(\lambda) = e^{[-b(\lambda-300)]}, \quad (1.26)$$

donde b hace referencia a un parámetro de ajuste obtenido para cada tipo de material, que fue identificado a partir del estudio del comportamiento de diferentes materiales a niveles de radiación controlados y cuyos valores se recogen en la tabla

1.1. Además, la misma tabla también muestra los valores de H_{dm} para cada grupo de materiales que es necesario para conseguir una diferencia de color en cada material perceptible por el ojo humano.

Tabla 1.1: Valores H_{dm} y valores b correspondientes a la función de $S(\lambda)$ para cinco categorías de materiales de museos.

Grupo	Muestras	$H_{dm}(Wh/m^2)$	b
a	Papel de baja calidad	5	0.038
b	Papel tela	1200	0.0125
c	Pinturas al óleo en lienzos	850	0.0115
d	Textiles	290	0.0100
e	Colorantes al agua en papel tela	175	0.0115

1.5. Objetivos generales y específicos

El objetivo principal de esta tesis doctoral es aplicar la técnica de restauración fotónica virtual a la pintura de Dalí *Dos Figuras (1926)*. Esto implica el desarrollo de un sistema de iluminación diseñado para mejorar su apariencia durante su exposición a través de la proyección de luz con una distribución espectral optimizada sobre cada punto de su superficie. Esta iluminación se desarrolla a partir de medidas de reflectancia espectral y de la implementación del criterio de restauradores y conservadores, teniendo en cuenta las posibilidades reales espectrales y espaciales del sistema de proyección. La aplicación de esta técnica se llevará a cabo en la pintura de Salvador Dalí, *Dos figuras (1926)* que se encuentra en el MNCARS. Este objetivo general se compone de los siguientes objetivos específicos:

1. Diseñar un sistema de captura de imágenes multiespectrales (MSI) que permita realizar medidas de reflectancia espectral de alto rango dinámico (HDR) en cada punto de la superficie de la pintura con alta precisión espacial. Esto se conseguirá a partir de una matriz de cámaras con resolución espacial 4K, cada una con un filtro espectral a una longitud de onda determinada.
2. Crear dicho sistema utilizando elementos de bajo coste de forma que pueda ser fácilmente implementado en las instituciones y museos.

3. Crear un método de calibración que permita corregir la falta de uniformidad en la iluminación sobre obras de arte durante la toma de medidas de reflectancia espectral a partir de imágenes multiespectrales (MSI) o hiperespectrales (HSI). Este método pretende eliminar la necesidad de utilizar superficies uniformes de calibración del mismo tamaño que la obra de arte a analizar.
4. Crear métodos específicos de análisis y segmentación del pigmento rojizo presente en la pintura de Dalí. Estos métodos se basarán en medidas de reflectancia espectral HDR obtenidas mediante un sistema de captura MSI diseñado ad-hoc para esta investigación.
5. Desarrollar los algoritmos de cálculo requeridos para lograr una iluminación óptima que permita la visualización de la pintura de Dalí, reduciendo al mínimo el daño fotoquímico presente en comparación con la iluminación estándar D65, sin alterar su aspecto respecto a dicha iluminación.
6. Desarrollar los algoritmos necesarios para poder obtener un sistema de iluminación para obras de arte optimizado espectralmente punto por punto. Este sistema permitirá la exhibición de la pintura de Dalí con una apariencia restaurada, basada en los criterios de expertos restauradores y conservadores.
7. Validar los algoritmos y métodos desarrollados en los puntos anteriores mediante comparaciones con estándares establecidos, con el fin de demostrar su eficacia y facilitar su implementación en diversos contextos y aplicaciones.

1.6. Estructura de la tesis

Las investigaciones desarrolladas en esta tesis doctoral se han dividido en siete capítulos.

En el primer capítulo, se presenta la introducción de la tesis doctoral. En este capítulo se reflexiona acerca de la necesidad de la exposición del arte en la sociedad, explorando brevemente el contexto de la pintura de Dalí *Dos figuras (1926)*, objeto de esta investigación y su repercusión en la obra completa de Dalí y en los diferentes movimientos artísticos de la época. Además, en el mismo capítulo se describe el desafío relacionado con la exposición de las obras de arte teniendo

en cuenta su conservación y se plantean nuevas técnicas que podrían resolverlo. En la introducción se incluyen los conceptos fundamentales que sirvan como base para comprender las investigaciones presentadas a lo largo de la tesis doctoral.

En el segundo capítulo se describe el desarrollo y validación de una cámara multispectral con una resolución de 4K para la medida de reflectancia espectral HDR de obras de arte. En este capítulo además se describe un método desarrollado para la calibración de la falta de la uniformidad de la iluminación en su superficie y así simplificar el procedimiento de medida de reflectancia espectral con MSI o HSI, especialmente indicado para aquellas obras de arte de gran tamaño.

El tercer capítulo muestra las medidas de reflectancia espectral de la pintura de Dalí *Dos figuras (1926)* y dos métodos de segmentación de pigmentos propuestos para llevar a cabo el análisis de un pigmento rojizo presente en su superficie.

En el cuarto capítulo se describe el desarrollo de una iluminación espectralmente optimizada para reducir el daño durante la exposición de la pintura de Dalí. Esta iluminación está diseñada para reducir el daño debido a la exposición sobre su superficie sin que esta nueva iluminación altere la apariencia de la pintura con respecto a la iluminación estándar del iluminante D65 propuesta por la CIE.

En el quinto capítulo, se presentan los algoritmos desarrollados para implementar la técnica de restauración fotónica virtual en la pintura de Dalí, y se lleva a cabo una simulación que confirma la viabilidad para implementar esta técnica sobre la obra de arte. Como demostrador se ha aplicado la técnica de restauración fotónica virtual en la pintura *Dos figuras (1926)*.

Finalmente, se exponen las conclusiones obtenidas tras el desarrollo de esta investigación y propuestas de mejora que sirvan para continuar en esta línea de investigación.

Capítulo 2

Diseño y desarrollo de un sistema de captura de imagen multiespectral de alto rango dinámico para medidas de reflectancia espectral de obras de arte

La reflectancia es una propiedad inherente al objeto [26]. El análisis de objetos mediante mediciones de reflectancia espectral se aplica y utiliza ampliamente en multitud de campos, como la agricultura, la medicina, la criminología y la restauración y conservación de obras de arte, entre otros sectores. Esto es debido a que las variaciones de reflectancia espectral proporcionan información relevante sobre el estado del objeto analizado en un momento determinado [27, 28].

La CIE recomienda diferentes condiciones geométricas entre la muestra, la iluminación y el instrumento de medición en las medidas de reflectancia espectral [29]. En función de estas condiciones, se clasifican diferentes tipos de reflectancia espectral. Entre los métodos propuestos por la CIE para medir la reflectancia espectral, se recomienda realizar las medidas utilizando una esfera integradora para garantizar que la muestra esté iluminada uniformemente desde todos los ángulos.

Sin embargo, cuando se trabaja con obras de arte, Fairchild recomienda utilizar la geometría bidireccional 0-45° propuesta por la CIE, en la que el receptor se sitúa en la normal con respecto a la muestra a analizar y el emisor se sitúa a 45° con respecto a la normal [15]. Esta configuración geométrica minimiza la componente especular propia de la reflexión y, por lo tanto, permite visualizar las características propias de la superficie del material iluminado, como pueden ser sus rugosidades.

Para calcular la reflectancia espectral inicialmente se debe obtener la energía reflejada $L(\lambda)_S$ por la muestra bajo análisis. Posteriormente, bajo condiciones idénticas de iluminación y ángulos de observación, se registra la energía reflejada por una superficie de calibración $L(\lambda)_{Cal}$ con valor de reflectancia espectral $\rho(\lambda)_{Cal}$ conocido. Matemáticamente se expresa del siguiente modo:

$$\rho(\lambda) = \rho(\lambda)_{Cal} \cdot \frac{L(\lambda)_S}{L(\lambda)_{Cal}} \quad (2.1)$$

Los instrumentos empleados para las medidas de reflectancia espectral de obras de arte deben respetar su limitación de no contacto para evitar dañar las obras de arte, por este motivo, típicamente se utilizan espectrofotómetros de imagen para esta aplicación [30]. Aunque permiten la caracterización de la muestra con alta resolución espectral, los espectrofotómetros tienen un área de medición limitada y, por lo tanto, no son adecuados para su uso en obras de arte grandes. Por ello, la técnica de obtención de reflectancia espectral a partir de imágenes multiespectrales (MSI) e hiperespectrales (HSI) se ha extendido en el contexto de la restauración y conservación de patrimonio cultural para el análisis de obras de arte evitando el contacto con ellas y reduciendo la limitación espacial en las medidas [31]. Las cámaras multiespectrales e hiperespectrales permiten obtener un conjunto de imágenes donde cada imagen incluye la escena capturada a una longitud de onda concreta. Al conjunto de todas las imágenes obtenidas se le denomina cubo espectral. Dos dimensiones del cubo espectral corresponden a las dimensiones espaciales o tamaño de la imagen expresada en píxeles ($m \times n$ píxeles) y la tercera dimensión corresponde a la longitud de onda λ (Figura 2.1). El procesado de las MSI o HSI obtenidas permite adquirir la reflectancia espectral difusa con la resolución espacial en función del tamaño de píxel de los sensores del sistema y la calidad óptica del mismo, ya que obtienen información espectral de la escena medida en cada píxel (px) de la imagen.

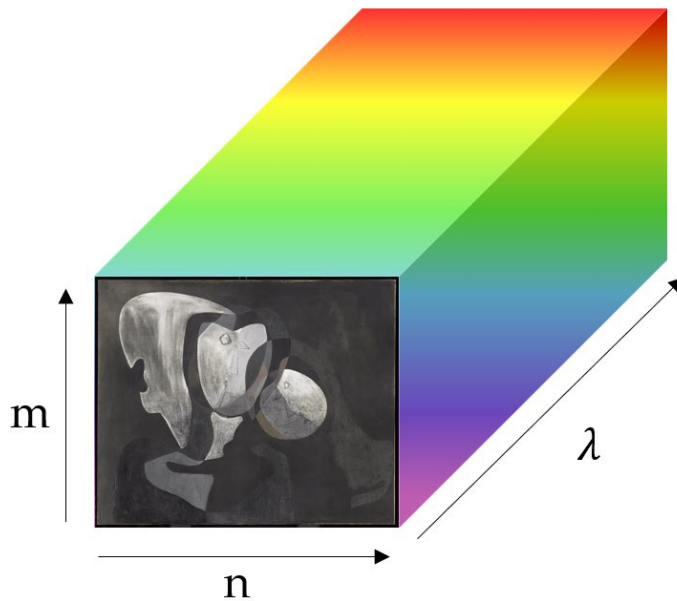


Figura 2.1: Esquema de cubo de imagen espectral.

En la bibliografía actual, no existe un consenso científico claro sobre la diferencia entre una cámara multispectral y una cámara hiperespectral. En ella, se explica que dicha diferencia está relacionada con la resolución espectral y espacial de los sistemas. Los sistemas hiperespectrales tienen mayor resolución espectral y los sistemas multispectrales tienen mayor resolución espacial [32]. Sin embargo, como se indica en el libro de Chang, C. la resolución espectral de un sistema no viene determinada únicamente por el número de bandas espectrales que es capaz de capturar [33]. Más bien, como indica en su libro de Tao, L. y Mughees, A., es el ancho de banda espectral empleado el que proporciona la resolución espectral que el sistema puede capturar [34]. Las cámaras hiperespectrales obtienen entre 100-200 imágenes espectrales con un ancho de banda estrecho de 5-10 nm y las cámaras multispectrales permiten obtener entre 5-10 imágenes espectrales con un ancho de banda grande, es decir, 70-400 nm [34].

Para obtener la reflectancia espectral mediante medidas MSI o HSI, se inicia capturando una imagen de la muestra en análisis $I_S(\lambda)_{n,m}$. Como se ha descrito anteriormente, a continuación, se realizan las medidas MSI o HSI de una superficie de calibración $I_{Cal}(\lambda)_{n,m}$ con una reflectancia espectral conocida $\rho_{Cal}(\lambda)_{n,m}$. Las imágenes resultantes posibilitan el cálculo de la reflectancia espectral $\rho_S(\lambda)_{n,m}$ con

la precisión de cada píxel n y m de la cámara MSI o HSI empleada,

$$\rho_S(\lambda)_{n,m} = \rho_{Cal}(\lambda)_{n,m} \frac{I_S(\lambda)_{n,m} - I_{oscuridad}(\lambda)_{n,m}}{I_{Cal}(\lambda)_{n,m} - I_{oscuridad}(\lambda)_{n,m}}, \quad (2.2)$$

donde $I_{oscuridad}(\lambda)_{n,m}$ es la imagen oscura necesaria para calibrar el ruido del sensor y el fondo.

Este método ofrece notables ventajas para la identificación de pigmentos en obras de arte, ya que proporciona información detallada de superficies extensas con una alta resolución espacial sin la necesidad de desplazar el instrumento a lo largo de la superficie analizada, como es requerido en el caso de utilizar espectrofotómetros. De entre las diferentes investigaciones en las que realizan análisis de patrimonio cultural a partir de medidas de reflectancia espectral mediante MSI o HSI destacan las investigaciones de Mona F. Ali et al. [35] y de Cucci et al. [31]. Esta tecnología también se utiliza, entre otros, en teledetección área para arqueología y así poder obtener imágenes de grandes áreas [36].

Aunque los sistemas de captura MSI y HSI ofrezcan grandes ventajas para análisis de obras de arte, tienen algunas limitaciones que dificultan su uso en diferentes sectores. Por un lado, para poder calcular la reflectancia de cada píxel de la imagen obtenida con MSI o HSI de una superficie, la iluminancia medida en la superficie debe ser la misma en cada punto, por tanto la fuente de luz debe emitir una iluminación uniforme, o dicho patrón de iluminación debe ser conocido. La falta de uniformidad en la iluminación sobre la muestra afecta a las medidas de reflectancia espectral de varias maneras. Las variaciones en la cantidad de luz que incide en diferentes áreas de la muestra dará lugar a mediciones inconsistentes de reflectancia en distintos puntos. Esto puede distorsionar los datos y dificultar la interpretación precisa de la información espectral de la muestra. Es importante calibrar y corregir esta falta de uniformidad para obtener mediciones de reflectancia espectral consistentes y representativas de la muestra en su totalidad [37]. Para ello, el estado de la técnica se centra en desarrollar fuentes de iluminación con iluminancia altamente uniforme sobre la muestra [38, 39], y desarrollar métodos de calibración donde se aplican técnicas de procesamiento de imágenes y algoritmos para ajustar las intensidades de luz y corregir aquellas zonas no uniformes [40]. Típicamente se utiliza una superficie blanca lambertiana o cuasi lambertiana para calibrar la iluminación en medidas de reflectancia espectral. Es necesario que la

superficie del blanco de calibración tenga el tamaño de la muestra en las mismas condiciones de iluminación, limitando el tamaño de este y permitiendo de este modo omitir cualquier variación en la iluminación [41].

Por otro lado, los sistemas de captura de HSI y MSI están relacionadas con elevado coste de los sistemas comerciales. Lo cual ha llevado al desarrollo de sistemas alternativos que no sólo son más baratos, sino tan precisos como los sistemas comerciales [42]. Entre ellos destaca el uso de una rueda de filtros con diferentes longitudes de onda acoplada a una cámara monocromática. De esta forma, las imágenes espectrales se capturan secuencialmente obteniéndose finalmente una imagen con el rango espectral correspondiente al número de filtros utilizados [43]. Changying Li y Weillin Wang exploran sistemas HSI que utilizan la tecnología de filtros sintonizables de cristal líquido (LCTF) para el análisis de vegetales. La tecnología LCTF permite controlar la luz transmitida seleccionando la longitud de onda de transmisión y excluyendo el resto. Por lo tanto, estos sistemas permiten obtener HSI sin necesidad de intercambiar los filtros espectrales entre las mediciones [44]. Baek et al. diseñaron un sistema de obtención de HSI utilizando la dispersión en la imagen obtenida a través de prismas. Otros estudios optimizaron la información espectral de las fuentes de luz LED obteniendo secuencias de bandas espectrales para capturar cada imagen espectral [45]. Geelen et al. desarrollaron un sistema HSI modificando la matriz de Bayer del sensor utilizado. En su experimento, utilizan filtros ópticos que se colocan monolíticamente sobre los píxeles del sensor de la cámara. De esta forma consiguen un sistema con un aumento de la resolución espectral de la cámara, sin modificar la resolución temporal de captura de la imagen con respecto a las cámaras RGB [46]. N. Genser et al. propusieron un sistema matricial de cámaras, cada una con un filtro espectral, para la captura de MSI [47].

Los sistemas de captura MSI y HSI disponibles comercialmente y los prototipos diseñados en investigaciones proporcionan un alto rendimiento de imagen. Por ejemplo, Specim IQ es una cámara hiperespectral capaz de obtener imágenes en 204 bandas espectrales que cubren el rango espectral de 400 a 1000 nm y con una resolución espacial de 1260x960 px. La cámara multiespectral Micasense ReddishEdge-P toma imágenes en 5 bandas espectrales con una resolución espacial de 2464x2056 px. Se han desarrollado numerosas investigaciones con el objetivo de capturar HSI con alta resolución espacial. En su investigación, Yifan et al. han

desarrollado un algoritmo para obtener imágenes con la resolución espacial de MSI y la resolución espectral de HSI a través de la transformada wavelet 3D [48]. Asimismo, con el objetivo de obtener HSI con alta resolución espacial, Akhtar et al. han desarrollado un algoritmo para procesar imagen RGB con mayor resolución espacial y definir espectralmente los canales RGB de esta imagen [49].

Otra limitación asociada a los sistemas de captura de MSI y HSI es que, típicamente suelen utilizar sensores de imagen de dispositivo de carga acoplada (CCD) o de semiconductor de óxido metálico complementario (CMOS), que tienen un rango dinámico limitado y una respuesta parcialmente no lineal [50]. En el análisis de obras de arte mediante MSI y HSI, esta limitación se refleja cuando la propia obra de arte tiene un alto rango dinámico (HDR) en sus escena. La imagen obtenida de esa escena será de bajo rango dinámico (LDR) con zonas fuera del rango dinámico lineal del sensor, mostrando imágenes con píxeles saturados o subexpuestos.

Por último, la uniformidad de la iluminación sobre una obra de arte no siempre está controlada. Incluso si la obra de arte no tiene una variación energética en la reflectancia espectral de sus pigmentos, esta variación en la contribución energética sobre la escena puede generar una limitación en el rango dinámico de la MSI o HSI obtenidas. Para solucionar este problema, se han utilizado imágenes de alto rango dinámico (HDR). Esta técnica consiste en combinar varias imágenes de la misma escena a diferentes tiempos de exposición permitiendo así capturar un rango energético más amplio en la misma imagen [51]. En 2008, J. Brauers et al. combinaron por primera vez la tecnología multispectral con la tecnología HDR utilizando un sistema de rueda de filtros espectrales acoplado a una cámara RGB [50]. Sin embargo, los sistemas de captura de MSI que utilizan una rueda de filtros capturan cada imagen secuencialmente, lo que aumenta el tiempo de captura en comparación con los sistemas no secuenciales. Esta combinación también ha sido utilizada por M. A. Martínez et al., que obtuvieron la reflectancia espectral mediante HSI HDR utilizando un escáner lineal hiperespectral [30].

En este capítulo, se describe el desarrollo de un sistema de captura MSI, el cual ha sido patentado con examen sustantivo bajo la referencia ES2819052-B2 [52]. Consiste en una matriz de 12 cámaras con un filtro espectral interferencial instalado en cada cámara [53]. El procesado de estas imágenes permite obtener MSI HDR, que se utilizan posteriormente para obtener la reflectancia espectral HDR. El sistema desarrollado, denominado Hypermatrixcam (*HYCAM*), ha sido

diseñado para obtener el parámetro de reflectancia espectral de obras de arte con el fin de obtener información espectral y colorimétrica objetiva y de alta calidad sobre el estado de la pintura de Salvador Dalí *Dos figuras (1926)* para poder llevar a cabo la caracterización de sus pigmentos y poder implementar sobre ella la técnica de restauración fotónica virtual [41, 54]. Además, también se describe un método de calibración de la falta de la uniformidad de la iluminación con el fin de evitar el requerimiento del uso de un material de calibración del mismo tamaño que la muestra a medir en medidas de reflectancia espectral a través de medidas HSI.

2.1. Diseño y prototipo de un sistema de captura de imagen multiespectral

El sistema de captura MSI descrito en esta sección ha sido desarrollado a partir de dispositivos accesibles comercialmente, superando así la limitación económica que presentan las cámaras multiespectrales e hiperespectrales comerciales. Está formado por doce cámaras dispuestas en un conjunto matricial (3 x 4). Cada cámara tiene un filtro espectral pasa banda interferencial para obtener MSI a cada longitud de onda determinada (Figura 2.2a). El sistema desarrollado pretende capturar MSI con la mayor señal posible optimizando el tiempo de adquisición para minimizar la exposición de las obras de arte a la luz durante las mediciones. El control del proceso y la optimización del tiempo de captura de imágenes se realizó utilizando tres mini ordenadores Raspberry Pi 4 en lugar de uno para el control de las cámaras con el fin de reducir el tiempo de captura en un factor 3. Cada Raspberry Pi controla cuatro cámaras utilizando multiplexores Arducam's Multi-camera adapter board v2.2 multiplexers (Figura 2.2b). Con el fin de hacer de *HYCAM* un sistema de captura inalámbrico, se define una dirección IP para cada Raspberry Pi, y a través de la conexión WI-FI se controla la captura de cada cámara mediante un ordenador PC.

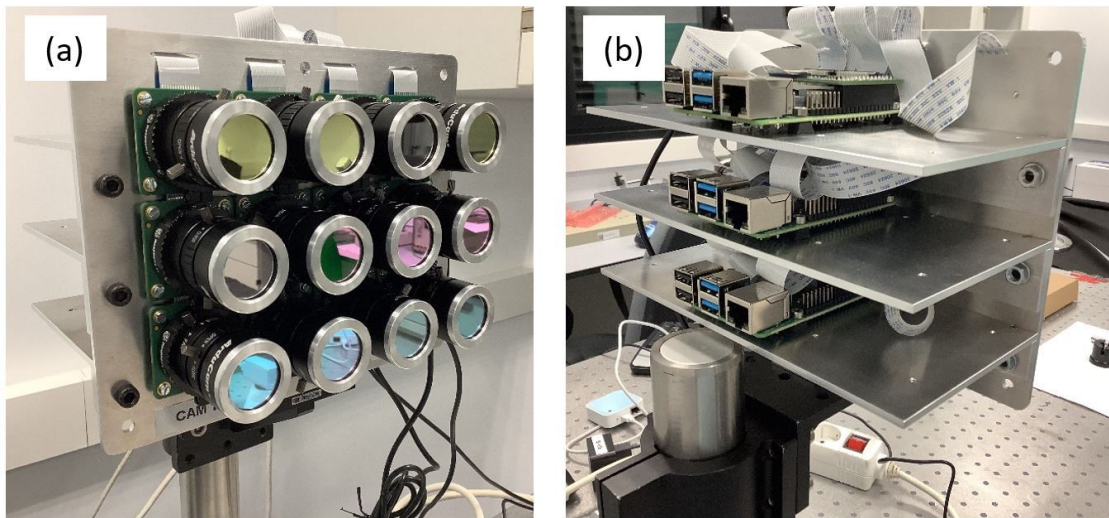


Figura 2.2: Vista frontal de HYCAM donde se pueden ver los filtros espectrales utilizados acoplados a las cámaras Raspberry pi HQ (a). La vista trasera muestra la configuración de las tres Raspberry Pi 4 utilizadas para controlar las 12 cámaras (b).

El modelo de cámara elegido para el desarrollo del sistema fue Raspberry Pi Hq camera con sensor Sony IMX477 RGB CMOS. Estas cámaras pueden obtener imágenes con resolución espacial de 4K (4056×3040 px.) y profundidad de color de 12 bits. Aunque el uso de sensores RGB compromete la cantidad de señal obtenida en algunas longitudes de onda con respecto a los sensores monocromáticos (Figura 2.3), los sensores RGB tienen mejores prestaciones en cuanto a resolución y profundidad de color y además son más asequibles que los sensores monocromáticos tanto económica como comercialmente.

Con el fin de obtener el mayor campo con las cámaras, sin que aparezca viñeteo en las imágenes obtenidas, sobre cada cámara se instaló el modelo de ópticas del fabricante Arducam de 12 mm de focal diseñado específicamente para este modelo de cámaras Raspberry Pi. Este objetivo tiene una abertura de diafragma máxima de F1.2; de este modo, a la distancia mínima de enfoque (0.2 m), se obtiene una resolución de 50 píxeles/mm de la pintura. Cada cámara tiene un campo de visión de 30° en horizontal y $22,7^\circ$ en vertical, por lo que teniendo en cuenta el desplazamiento espacial entre cámaras, *HYCAM* puede cubrir un campo de visión de $23,4^\circ \times 20,5^\circ$ (H \times V).

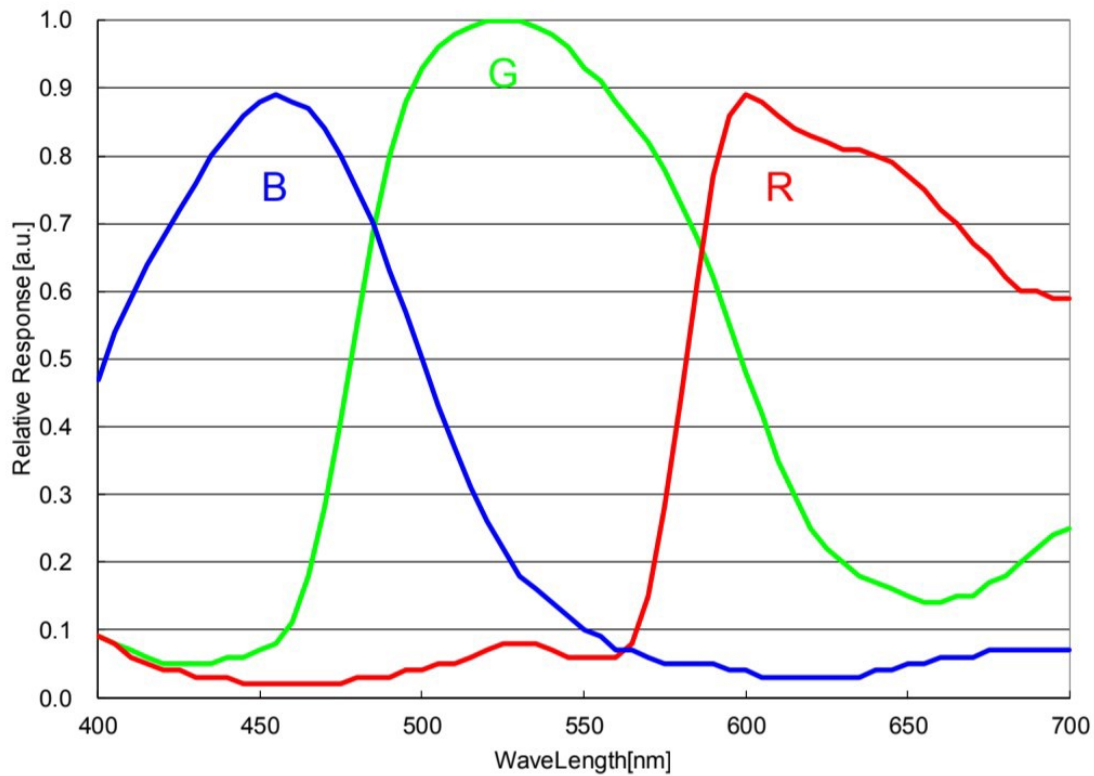


Figura 2.3: Sensibilidad espectral de los sensores Sony IMX477. <https://www.arducam.com/sony/imx477>).

Los filtros espectrales utilizados en el desarrollo del sistema son filtros pasa banda de la empresa Thorlabs. Son fácilmente intercambiables, pues se colocan sobre las ópticas con un sistema mecánico de rosca de aluminio, diseñado ad-hoc para el sistema. Dado que el sistema desarrollado será utilizado para caracterizar las obras de arte con aplicación a la técnica de restauración fotónica virtual, la selección de los filtros espectrales se realizó en función de la curva de sensibilidad del ojo humano ($V(\lambda)$). Teniendo además en cuenta que las cámaras utilizadas son RGB, se seleccionó el rango del espectro visible comprendido entre 470 y 690 nm en pasos de 20 nm para cubrir el rango de la señal espectral máxima de las cámaras con el espectro continuo. La curva de transmitancia de los 12 filtros (Figura 2.4) se midió con un espectrofotómetro de fibra óptica (HR Spectrophotometer de StellarNet Inc., Tampa, FL, EE.UU.).

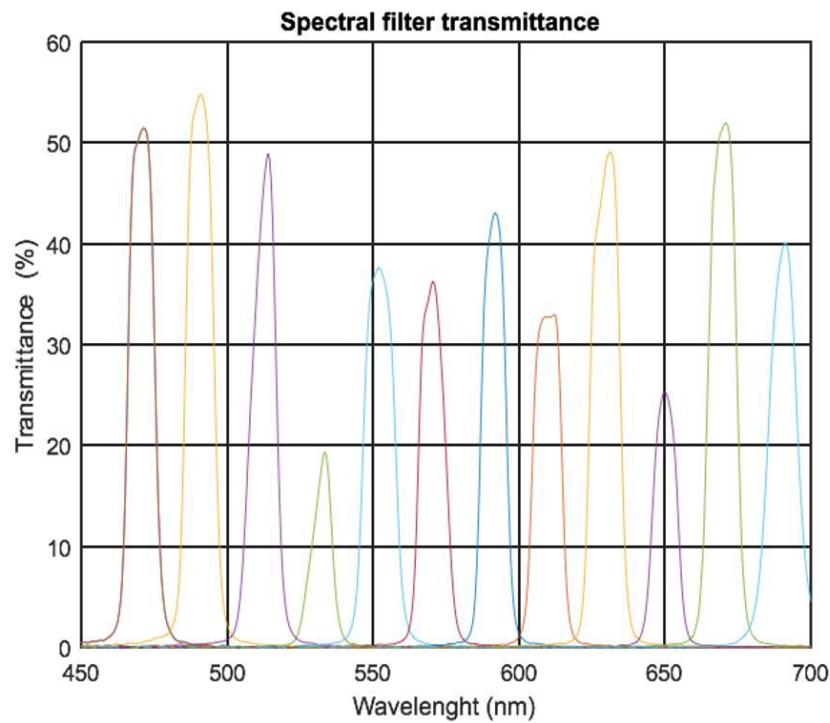


Figura 2.4: Transmitancia de los filtros pasa banda ordenados de izquierda a derecha de 470, 490, 510, 530, 550, 570, 590, 610, 630, 650, 670 y 690 nm.

2.1.1. Validación a partir de medidas de reflectancia espectral de alto rango dinámico (HDR)

Con el fin de validar el sistema de captura de imágenes MSI descrito en la sección anterior, se realizaron medidas de reflectancia espectral de una tarjeta Colorchecker y de siete patrones de Spectralon con valor de reflectancia calibrado por el laboratorio Labsphere (Figura 2.5). Estas medidas fueron realizadas utilizando la configuración bidireccional 0-45° para medidas de reflectancia espectral recomendada por Fairchild en su libro “Color appearance models”, como se muestra en la figura 2.6 [15]. En esta configuración, la fuente de luz se colocó con su centro geométrico a 45° del centro del área de medición con respecto a la normal, donde se encontraba *HYCAM*.

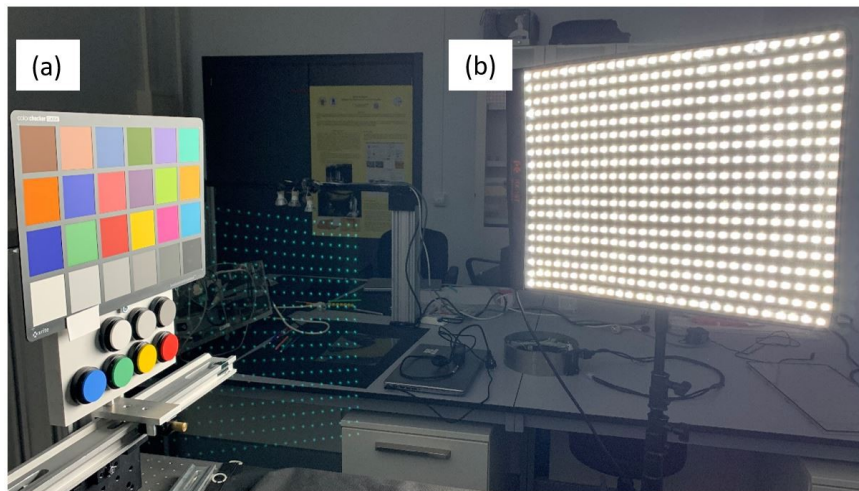


Figura 2.5: Sistema experimental en el laboratorio donde aparece la muestra utilizada que consta de una tarjeta Colorchecker (modelo clásico) y siete patrones de reflectancia Spectralon de Labsphere (a). La iluminación se realizó con una fuente de 1000 lux de magnitud sobre la muestra (b).

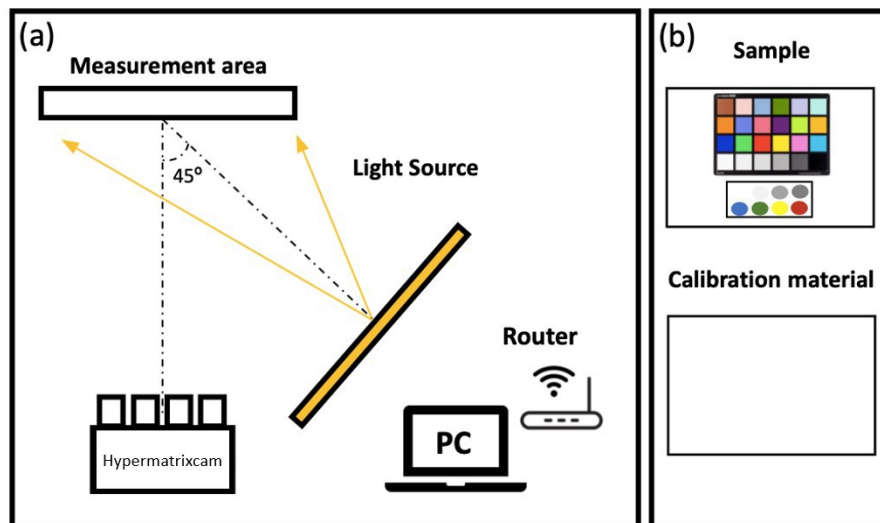


Figura 2.6: Esquema de la configuración experimental de medición utilizado para obtener la reflectancia espectral mediante MSI HDR. La fuente de luz se coloca a 45° con respecto al dispositivo de medición, *HYCAM* (a). Las muestras a medir, que incluyen el Colorchecker, las muestras patrón y el objetivo de calibración (b), se colocan en la zona de medición.

La fuente de iluminación elegida para realizar las medidas fue el LED. Los LED son ampliamente utilizados en entornos museísticos debido a su capacidad para generar una cantidad mínima de calor y a su ausencia de emisión de radiación ultravioleta e infrarroja [55]. En particular, se empleó una luminaria compuesta por una matriz de LEDs con dimensiones de 610 x 410 mm y temperatura de color correlacionada de 5600 K. El perfil espectral de esta luminaria se muestra en la figura 2.7. Esta configuración proporciona una iluminación bastante uniforme sobre la muestra a medir, reduciendo al máximo los posibles efectos de reflexión especular que podrían alterar las mediciones.

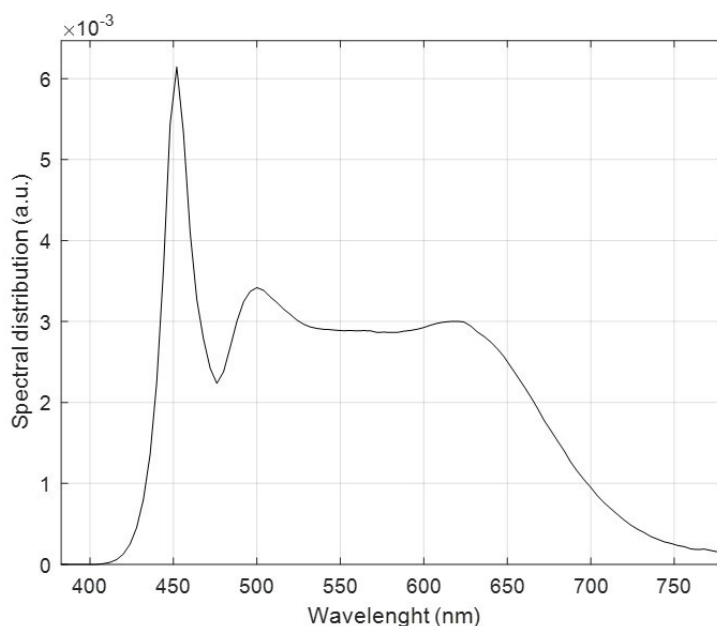


Figura 2.7: Distribución espectral del panel LED utilizado como sistema de iluminación para la medida de reflectancia espectral.

Una vez definida la geometría, como se muestra en la Figura 2.6a, se obtiene la reflectancia espectral de acuerdo a la ecuación 2.2. En esta investigación, las medidas MSI son realizadas en diferentes tiempos de exposición para posteriormente poder implementar el algoritmo HDR que se describirá a continuación. Y la calibración de la oscuridad se llevó a cabo mediante la toma de medidas MSI con los sensores cubiertos.

El material de calibración utilizado para esta medición fue cloruro de polivi-

nilo espumado (PVC) dado que es un material con propiedades difusoras y cuya curva de reflectancia espectral en el espectro visible es bastante acromática como se muestra en la figura 2.8. Su reflectancia espectral se midió utilizando un espectrofotómetro portátil Konica Minolta CM2600d que incluye en su interior una esfera integradora para realizar las medidas. Tanto la reflectancia espectral del PVC como las demás representaciones de reflectancia espectral mostradas en esta tesis doctoral se expresan en el ratio de 0 a 1.

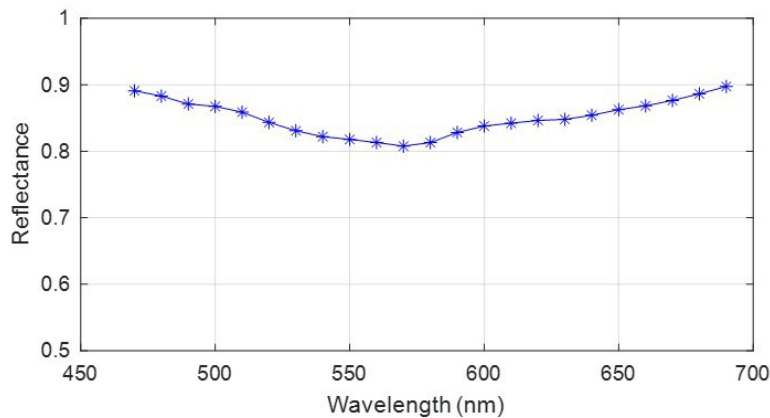


Figura 2.8: Reflectancia espectral del material PVC espumado utilizado como material de calibración en las medidas de reflectancia espectral.

Tanto la muestra como el material blanco de referencia se colocaron a 1.1 m de *HYCAM* para realizar las mediciones. Esta distancia se seleccionó para obtener la mayor resolución sobre el área de medición teniendo en cuenta el campo de visión de *HYCAM*.

Con el fin de validar el sistema desarrollado se midieron todas las muestras (siete muestras patrón y Colorchecker) en las mismas condiciones geométricas y de iluminación con un espectrofotómetro sin contacto (espectrofotómetro PR655) a pesar de que el fabricante ya facilitaba los valores de reflectancia espectral de los materiales. Para llevar a cabo las medidas de validación del sistema, el espectrofotómetro PR-655 se situó en la misma ubicación en la que previamente se había colocado *HYCAM*.

Dado que el sistema de captura MSI utilizado en estas mediciones consta de 12

cámaras dispuestas en forma de matriz, es necesario realizar una transformación geométrica de todas las imágenes para obtener el cubo de reflectancia espectral (Figura 2.9). Para llevar a cabo esta transformación, se ha desarrollado un algoritmo que se aplica mediante MatLab. Este algoritmo registra puntos característicos de las medidas MSI obtenidas de la muestra para lograr que los píxeles de cada punto coincidan en todas las longitudes de onda. De esta manera, se logra una alineación precisa de las imágenes y se obtiene el cubo de reflectancia espectral necesario para el análisis posterior.

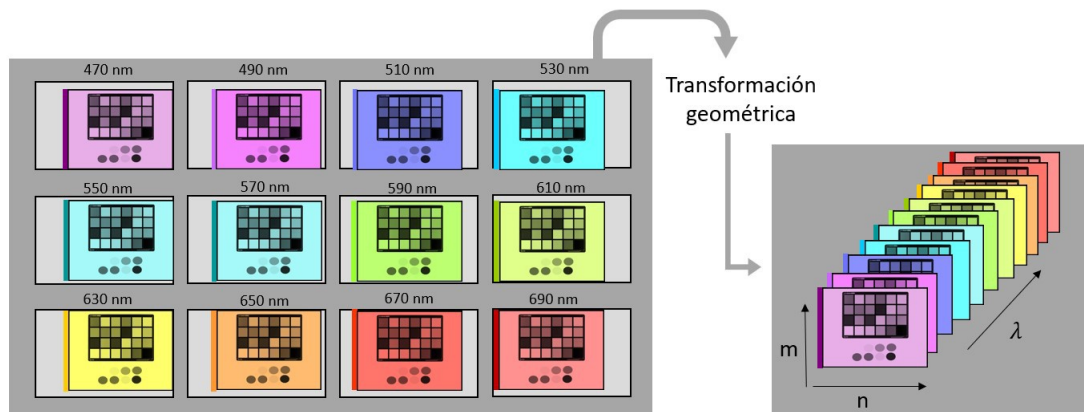


Figura 2.9: Esquema de la transformación geométrica de imágenes multispectrales (MSI) obtenidas con HYCAM.

Las cámaras Raspberry Pi HQ tienen sensores de tipo CMOS y una profundidad de color de 12 bits, por lo que las imágenes obtenidas están limitadas a 4096 niveles de gris. La curva de respuesta de la cámara en función del tiempo de exposición se obtuvo a partir de realizar capturas a diferentes tiempos de exposición con la cámara sin acoplar sobre ella ningún filtro espectral, colocando sobre ella el objetivo de 12 mm con el diafragma en posición de apertura máxima (Figura 2.10). La configuración experimental para realizar las medidas fue la mostrada en la figura 2.6 en la que la fuente de iluminación se ubica a 45° con respecto a la ubicación de la muestra y de la cámara. Como muestra para realizar las medidas se utilizó una lámina de PVC espumado y, como fuente de iluminación, el panel LED utilizado en las medidas de reflectancia espectral. Para obtener la curva de respuesta de la cámara en función del tiempo se calculó la media de los niveles de

gris de la zona seleccionada para cada tiempo de exposición comprendido entre 50 y 1900 ms. La zona de no linealidad de la cámara comienza en 4000 niveles de gris y la corriente oscura de los sensores está por debajo de 300 niveles de gris (Figura 2.10).

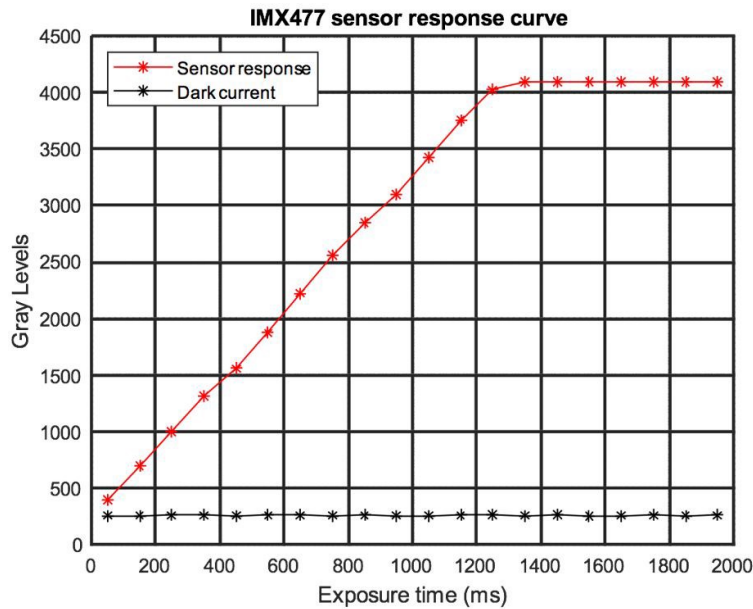


Figura 2.10: Curva de respuesta del sensor IMX477.

Algoritmo HDR

La limitación de profundidad de color de los sensores utilizados a 4096 niveles de gris da como resultado imágenes de bajo rango dinámico (LDR) con píxeles subexpuestos o saturados en el caso propuesto en el cual hay zonas con gran contraste. Para solventar este problema, se implementa un algoritmo HDR en estas imágenes LDR (Figura 2.11).

Este algoritmo, desarrollado con el software MatLab, consiste en la combinación de las imágenes obtenidas a diferentes tiempos de exposición. Para ello, los tiempos de exposición se seleccionaron de forma que al menos uno de los píxeles correspondientes a cada punto de la imagen obtenida estuviera dentro de la zona de linealidad del sensor. El resto de las imágenes seleccionadas deben estar en la zona sobreexpuesta, con las zonas de menor rango dinámico de la imagen dentro

de la zona lineal del sensor. En el desarrollo de este sistema, tomamos 4 imágenes. A continuación, se tomó la media ponderada de las imágenes seleccionadas con respecto a la imagen con mayor tiempo de exposición. Para realizar esta medición, se seleccionaron los píxeles cuyos valores de nivel de gris se encontraban dentro de la zona lineal del rango dinámico de la cámara. A partir de la figura 2.10 en la implementación de este algoritmo, se establecen límites para garantizar la linealidad en los resultados: el límite superior se fija en 3500 niveles de gris, mientras que el límite inferior se sitúa en 300 niveles de gris. El límite inferior se tomó como 300 niveles de gris porque es el valor de la corriente oscura de los sensores, medida tomando la imagen con los sensores cubiertos. El resultado de este proceso es una imagen HDR para cada canal RGB, que luego se suma.

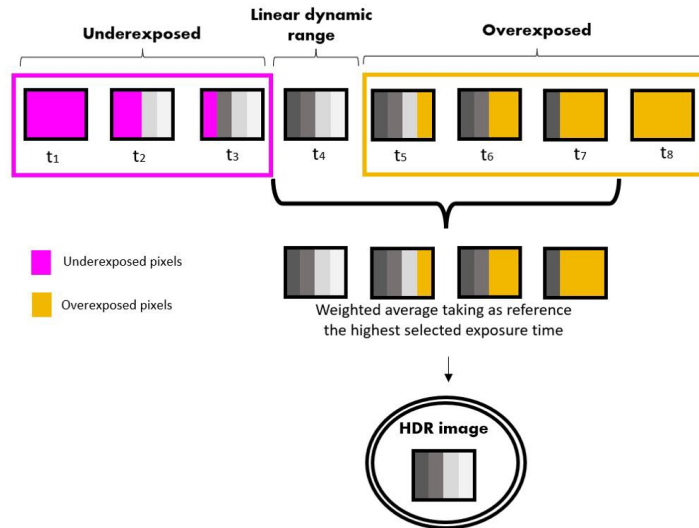


Figura 2.11: Esquema de procesamiento de imágenes LDR para obtener imágenes HDR.

El procedimiento matemático se describe:

$$HDR(n,m) = \frac{(\frac{t_{ref}}{t_1})LDR(n,m)_1 + (\frac{t_{ref}}{t_2})LDR(n,m)_2 + \dots + (\frac{t_{ref}}{t_q})LDR(n,m)_q}{q}, \quad (2.3)$$

donde t_{ref} corresponde al mayor tiempo de exposición tomado, $LDR_{(n,m)}$ corresponde con la imagen LDR con dimensiones espaciales de $n \times m$ píxeles en un

tiempo de exposición determinado t , y q corresponde al número de imágenes seleccionadas para crear la imagen HDR. Por último, $HDR_{(n,m)}$ corresponde a la imagen HDR con dimensiones espaciales de $n \times m$ píxeles. Una vez obtenida la imagen HDR para la muestra y para las medidas del blanco de calibración, se calculó la reflectancia espectral HDR a partir de la ecuación 2.2.

2.1.2. Resultados

La figura 2.12 muestra la imagen LDR (a) y la imagen HDR (b) a 490 nm de los materiales tomados como muestra para las mediciones. Para la imagen LDR se utilizaron imágenes con un tiempo de exposición de 350 ms. En la imagen LDR (Figura 2.12a), se muestra la suma de las imágenes de los tres canales R, G y B, y puede verse en naranja los píxeles cuyo valor en niveles de gris está por encima o por debajo de la zona de linealidad del sensor para algunos de los tres canales. Para generar las imágenes HDR y así poder obtener el cubo de reflectancia multiespectral HDR, se tomaron imágenes LDR a varios tiempos de exposición para cada cámara espectral. Para identificar los límites del rango dinámico de la cámara, las mediciones se tomaron inicialmente con tiempos de exposición entre 50 y 30100 ms. Se realizaron con estos tiempos de exposición para obtener una señal en todo el rango seleccionado de 470 a 690 nm y se observó que, para el tiempo de exposición de 1000 ms, los sensores con filtros espectrales entre 470 y 610 nm mostraban la imagen totalmente saturada. Sin embargo, los sensores de 630 a 690 nm necesitaron una exposición mayor para alcanzar la saturación en sus imágenes. Esto se debe a la influencia de la transmitancia de los filtros espectrales (Figura 2.3) en combinación con la diferencia en la sensibilidad espectral de los sensores RGB utilizados (Figura 2.4). Por lo tanto, se seleccionaron los tiempos de exposición dependiendo de la sensibilidad espectral de cada combinación de cámara y filtro espectral utilizada. De este modo, para cada medición variaron de 150 a 30100 ms en pasos de 300 ó 1000 ms, dependiendo del filtro utilizado. Una vez obtenidas las MSI de la muestra y del material blanco utilizado para la calibración (Figura 2.6b), se calculó el cubo de reflectancia espectral a partir de la ecuación 2.2.

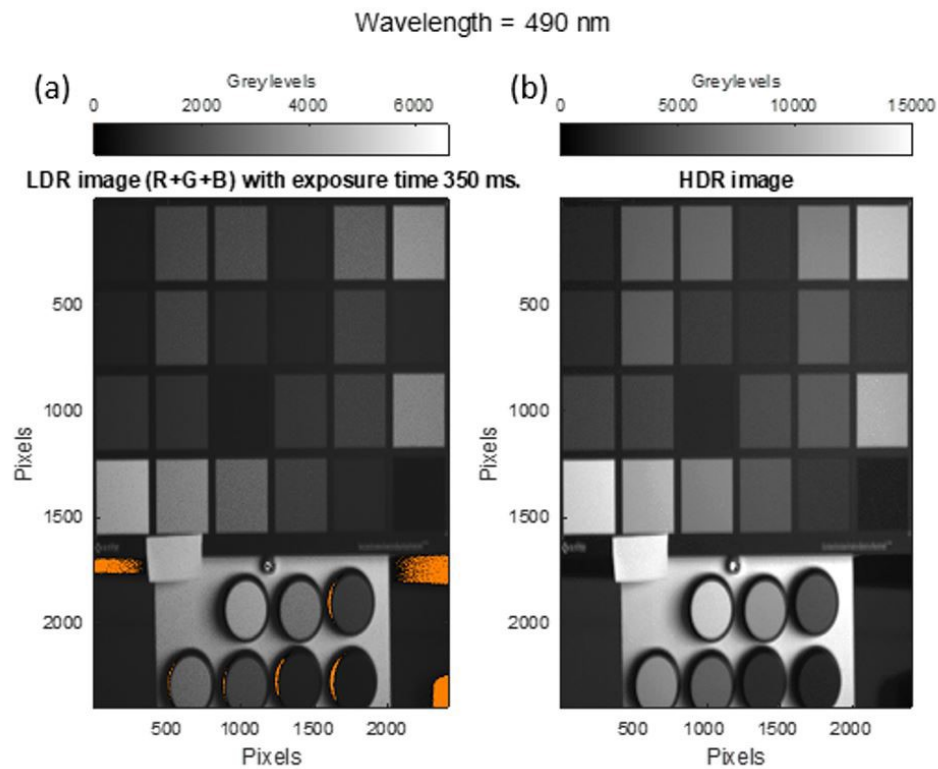


Figura 2.12: Imagen multispectral (MSI) LDR (a) y HDR (b) a 490 nm de la tarjeta Colorchecker y siete patrones de reflectancia Spectralon de Labsphere.

Para validar el sistema, se comparó la medida de reflectancia espectral HDR con la LDR, y ambas medidas se comparan con las obtenidas utilizando un espectrofotómetro (modelo PR-655 (Photo Research Inc., Topanga, CA, USA)). El espectrofotómetro utilizado toma un área de medición de 5 mm de diámetro a la distancia de trabajo de 40 cm e integra los valores de radiancia obtenidos. Posteriormente, al igual que con las medidas MSI, se utilizó la ecuación 2.1 para obtener la medida de reflectancia espectral. Además, las mediciones de reflectancia espectral HDR también se compararon con la reflectancia espectral proporcionada por el fabricante Labsphere de las muestras patrón calibradas en valor de reflectancia utilizados. En el ejemplo (Figura 2.13) se muestra la reflectancia HDR a 490 nm donde toda la reflectancia de los píxeles es procesada para estar dentro del comportamiento lineal.

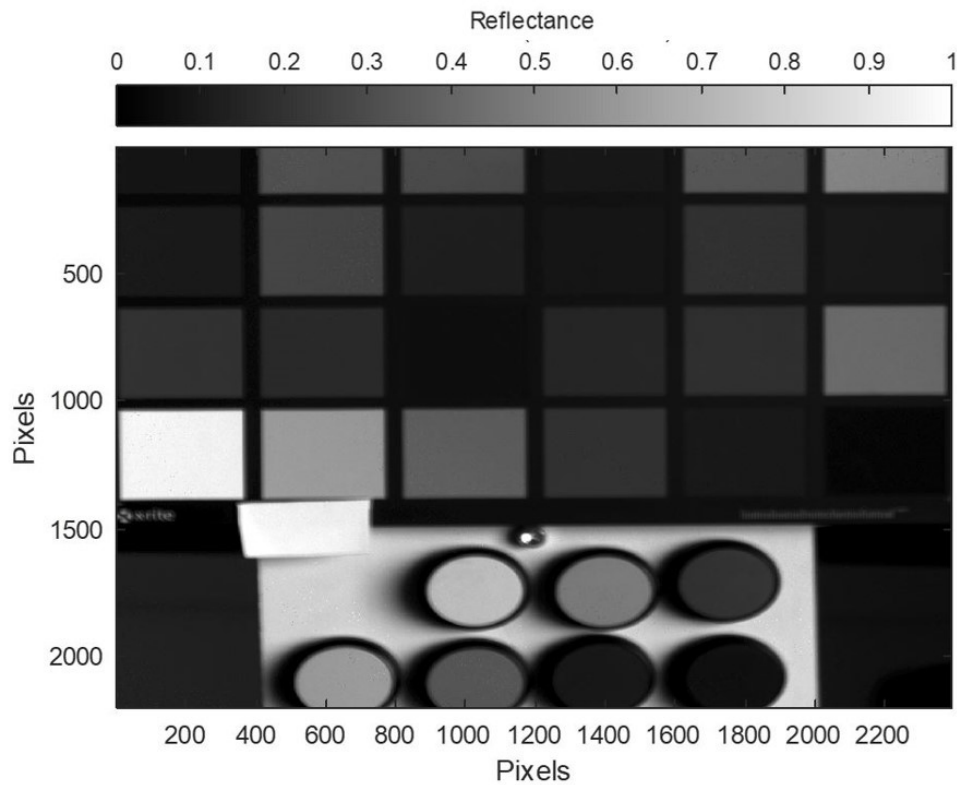


Figura 2.13: Se muestra una imagen HDR cuyo valor en escala de grises está calibrado al valor de reflectancia de 490 nm. La imagen incluye una tarjeta ColorChecker y siete muestras patrón calibradas en valor espectral por el laboratorio Labsphere.

En la figura 2.14, se presenta la reflectancia espectral de las muestras patrón amarillo, azul y verde del fabricante Labsphere. Esta figura muestra la reflectancia espectral en tres modalidades: LDR+, HDR y la proporcionada por el fabricante. La curva LDR+ corresponde a los valores LDR optimizados para cada sensor mediante la selección del tiempo de exposición máximo que obtenga señales máximas dentro del rango dinámico lineal del sensor.

Debido a la diferencia en la sensibilidad espectral de los sensores RGB, cada uno de estos sensores tendrá su límite máximo de rango dinámico lineal a un tiempo de exposición específico. Por lo tanto, para evaluar la reflectancia espectral mediante imágenes LDR, es necesario seleccionar los tiempos de exposición individualmente para cada sensor, con el objetivo de obtener la mayor señal posible en los píxeles

con valor máximo, siempre que estos valores de nivel de gris permanezcan dentro de la zona de linealidad del rango dinámico del sensor (Figura 2.10)

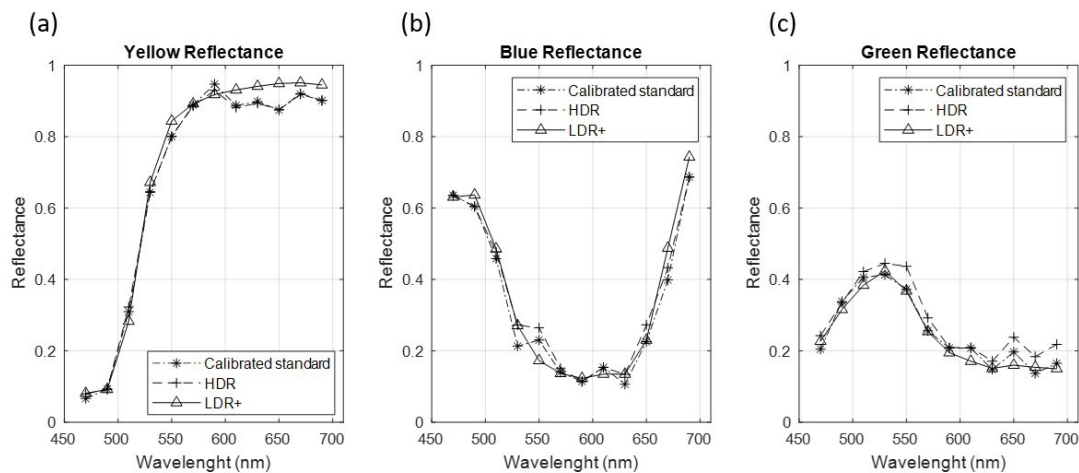


Figura 2.14: Reflectancia espectral obtenida mediante imágenes multispectrales (MSI) HDR y LDR+, junto con la curva de reflectancia espectral provista por el fabricante para las muestras patrón amarilla (a), azul (b) y verde (c) de Labsphere.

Para analizar la precisión colorimétrica y el error de medición del sistema, la tabla 2.1 muestra la diferencia de color ΔE_{ab}^* y el valor cuadrático medio (RMS) de la reflectancia espectral LDR y la reflectancia espectral HDR para las muestras patrón amarillo (Y), verde (G) y azul (B), así como el valor medio entre los resultados obtenidos para cada color analizado (\overline{M}). El valor de ΔE_{ab}^* se obtuvo utilizando el observador estándar CIE 1931 a 2° , y como iluminante de referencia, el iluminante LED utilizado en las medidas realizadas, cuyo SPD se muestra en la figura 2.7. Ambos parámetros se analizaron con respecto al espectrofotómetro PR-655 (Photo Research Inc., Topanga, CA, USA) y las curvas de reflectancia de las muestras estándares utilizadas, las cuales están calibradas en reflectancia espectral por el fabricante Labsphere. Los resultados presentados en la tabla 2.1 muestran una reducción tanto en el valor de ΔE_{ab}^* como en el valor RMS en los tres colores analizados al contrastar las mediciones realizadas con imágenes HDR respecto a las medidas LDR.

Tabla 2.1: Valores RMS de la reflectancia espectral LDR y HDR, así como los valores de ΔE_{ab}^* , calculados utilizando como referencia el SPD del panel LED y el observador estándar CIE 1931 a 2°. Estos resultados se comparan con las mediciones obtenidas mediante el espectrofotómetro PR-655 y las curvas de reflectancia calibradas proporcionadas por el fabricante.

	Comparación con la reflectancia espectral obtenida con PR 655				Comparación con la reflectancia espectral proporcionada por el fabricante			
	ΔE_{LDR+}	ΔE_{HDR}	RMS_{LDR+}	RMS_{HDR}	ΔE_{LDR+}	ΔE_{HDR}	RMS_{LDR+}	RMS_{HDR}
Y	3.36	2.07	0.046	0.045	2.53	1.28	0.038	0.037
G	5.23	4.88	0.037	0.020	4.17	3.42	0.043	0.021
B	9.72	5.95	0.059	0.042	4.32	1.78	0.039	0.042
\bar{M}	6.10	4.30	0.047	0.036	3.67	2.16	0.040	0.033

2.2. Método de calibración de la uniformidad de la iluminación con aplicación en medidas de reflectancia espectral a partir de imágenes multispectrales (MSI) e hiperespectrales (HSI).

El uso de pantallas con valor de reflectancia conocido del mismo tamaño de la muestra a medir permite la calibración de la iluminación en medidas de reflectancia espectral con MSI o HSI. Sin embargo, resulta un inconveniente colocar pantallas de calibración del tamaño de la muestra a medir, especialmente cuando se trata de muestras de gran tamaño. Esta sección describe un método para conocer el patrón de iluminación sobre una muestra iluminada a partir del desplazamiento controlado de la muestra o de la iluminación, para calibrar la falta de uniformidad de la iluminación. El método se ha desarrollado específicamente para evitar el uso de pantallas lambertianas del mismo tamaño que la muestra o una iluminación altamente uniforme al realizar mediciones de reflectancia espectral a partir de MSI o HSI. El método descrito en esta sección ha sido patentado bajo la referencia ES2911099-B2 con examen sustantivo [56].

2.2.1. Método

Cuando la radiación óptica incide sobre un objeto, la parte de la radiación que genera el fenómeno de la visión es la parte reflejada. Como se ha descrito en la introducción general de esta tesis doctoral, el color de un objeto se define por la combinación de su reflectancia espectral, la luz que incide sobre él y la respuesta espectral del ojo humano. De este modo, el perfil espectral reflejado es el producto entre la reflectancia espectral del objeto y el perfil espectral de la iluminación incidente sobre su superficie. Si consideramos la iluminación incidente sobre un objeto como un vector $\vec{E}(\lambda)_i$, donde i es el número de elementos, y esta iluminación incide sobre un objeto con una reflectancia $\rho(\lambda)_i$, la parte reflejada puede ser expresada como $\vec{L}(\lambda)_i$, definida matemáticamente de la siguiente manera:

$$\vec{L}(\lambda)_i = \rho(\lambda)_i \vec{E}(\lambda)_i. \quad (2.4)$$

Si el objeto se desplaza en el eje horizontal, la reflectancia espectral $\rho(\lambda)_i$ se convierte en $\rho(\lambda)_{(i-1)}$, mientras que el perfil espectral de la iluminación permanece constante. En esta situación, aunque el perfil espectral reflejado no se desplaza, varía debido al cambio de posición del objeto. Por lo tanto, obtenemos un nuevo perfil, denotado como $\vec{L}'(\lambda)_i$, definido como:

$$\vec{L}'(\lambda)_i = \rho(\lambda)_{(i-1)} \vec{E}(\lambda)_i. \quad (2.5)$$

Al calcular la razón entre \vec{L} y \vec{L}' , se obtiene el factor \vec{k}_i ,

$$\vec{k}_i = \frac{\vec{L}(\lambda)_i}{\vec{L}'(\lambda)_i}. \quad (2.6)$$

Y de este modo, finalmente se puede obtener el patrón de iluminación sobre la muestra \vec{F}_i a partir del producto entre los factores \vec{k}_i ,

$$\vec{F}_n = \vec{k}_1 \vec{k}_2 \vec{k}_3 \vec{k}_n \quad (2.7)$$

2.2.2. Configuración experimental y procedimiento de medida

Para poder realizar la calibración de la uniformidad de la iluminación en el plano de la obra, es necesario desarrollar una configuración experimental que per-

mita el desplazamiento de la muestra o de la iluminación, ambos en sentido horizontal o vertical. En la figura 2.15 se muestra de forma esquemática un prototipo de configuración ideal que reúne los requisitos señalados.

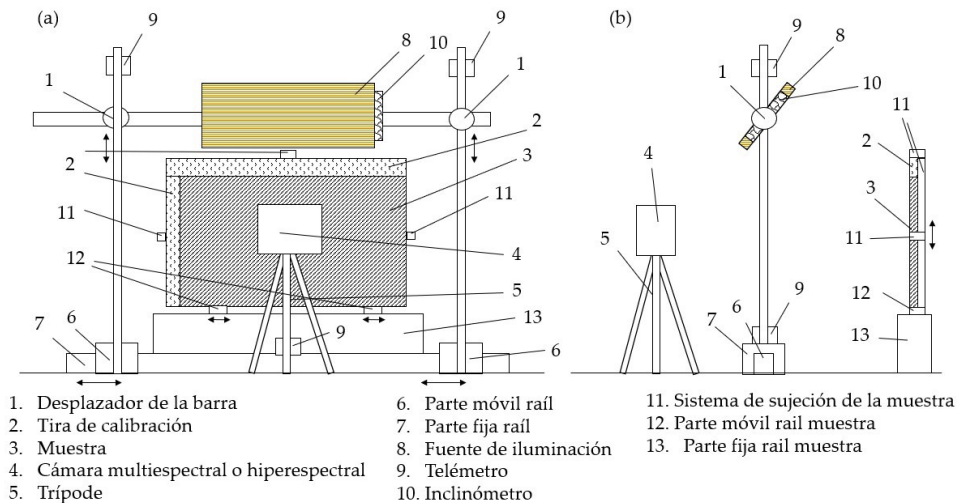


Figura 2.15: Esquema del instrumento para calibrar la uniformidad de la iluminación en una muestra en vista frontal (a) y vista lateral (b).

La estructura está formada por dos barras de sujeción verticales, una barra de sujeción horizontal y una base de sujeción de las barras verticales. La barra horizontal se utiliza para sujetar la fuente de iluminación y dos telémetros láser para garantizar la alineación correcta de los elementos con respecto a la muestra. Las barras horizontales se sujetan a las barras verticales mediante desplazadores de barra que permiten ajustar tanto la altura de la fuente de iluminación como la posición de los telémetros. Además, la barra en la que se sujeta la fuente de iluminación permite la rotación de dicha fuente con un inclinómetro para garantizar la inclinación de 45° con respecto a la muestra recomendada en medidas de reflectancia espectral de obras de arte. Las barras verticales están fijadas a la base de sujeción que puede alternar su posición mediante un sistema de raíl entre, al menos, dos localizaciones predefinidas provocando el desplazamiento horizontal de la fuente de luz. Sobre la parte fija del raíl, se incluye un tercer telémetro de manera que los tres telémetros que incluye el instrumento de calibración conforman un plano para garantizar que la estructura rígida y la muestra que se desea analizar estén en planos paralelos. El instrumento para calibrar la uniformidad de la

iluminación incluye también un luxómetro fijado a la estructura, para analizar la estabilidad de la fuente de iluminación. La muestra se coloca sobre un sistema que garantiza su sujeción. Un sistema de raíl permite que la muestra se desplace en horizontal y, el sistema de sujeción sobre el que se coloca, permite el desplazamiento en vertical. El instrumento se completa con una tira de calibración vertical u horizontal que consiste en una lámina de un material típicamente blanco, lambertiano y con propiedades de reflectancia conocidas y constantes en toda su extensión. La colocación horizontal o vertical de dicha tira de calibración dependerá del sentido del desplazamiento elegido para implementar el método, siendo horizontal si el desplazamiento es vertical o vertical si dicho desplazamiento es horizontal. Este material se caracteriza por tener un tamaño inferior al de la muestra a testar, teniendo en cuenta que el límite inferior de dicho tamaño se corresponde con una extensión de 5 píxeles en una de las dimensiones e igual longitud que la altura de la muestra en la otra dimensión.

2.2.3. Validación del método

El método de calibración descrito fue validado realizando la calibración de la uniformidad de la iluminación a través de MSI de una pintura al óleo (Figura 2.16).



Figura 2.16: Pintura al óleo utilizada como muestra para validar el método de calibración de la uniformidad de la iluminación.

Para ello, se llevó a cabo la configuración experimental, descrita de forma esquemática en la figura 2.17, y en ella se realiza el desplazamiento horizontal de la muestra manteniendo la fuente de iluminación en posición fija formando 45° con el instrumento de medida. Con el fin de comprobar la viabilidad del método, se realizó también la calibración de una superficie blanca uniforme de PVC espumado que permitiera identificar con facilidad el patrón de iluminancia.

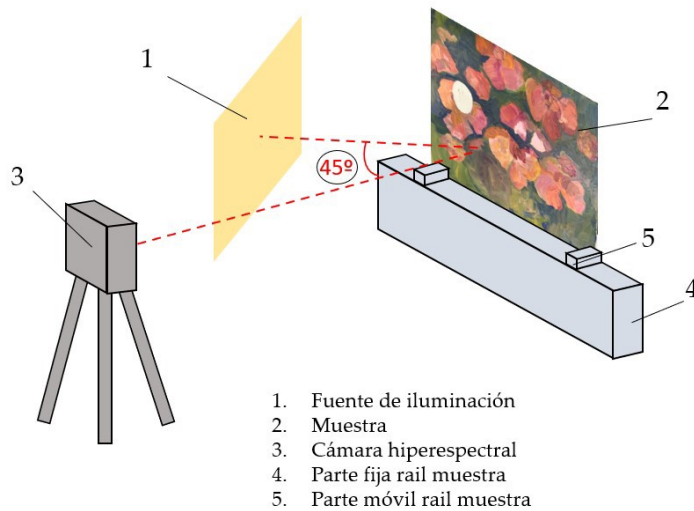


Figura 2.17: Esquema del montaje experimental desarrollado para llevar a cabo la calibración del método de calibración de la uniformidad de la iluminación

Las imágenes se capturan a través de la cámara multiespectral, llamada HY-CAM, descrita en la sección 3.1. Para ello, la muestra se ubicó a un metro de distancia con respecto a la cámara multiespectral y la fuente de iluminación se colocó, siguiendo las recomendaciones de Fairchild y de la CIE, formando 45° con la muestra para así evitar la componente especular de la reflexión [29, 15]. En las medidas realizadas se utiliza la configuración en la que se desplaza la muestra en sentido horizontal, y tanto la fuente de iluminación como la cámara multiespectral, permanecen en posición estática. Para ello, la cámara multiespectral captura dos imágenes de la muestra a analizar $I_A(n,m)$ e $I_B(n,m)$ variando entre ellas la posición de la muestra mediante el desplazamiento horizontal por medio del raíl de la base de sujeción de la muestra. El desplazamiento debe ser suficiente para que entre ambas imágenes haya al menos una diferencia de una columna de píxeles (n),

pero, dado que el método se basa en obtener el patrón de uniformidad a partir de la razón entre dos imágenes desplazadas. Dicho desplazamiento no debe ser muy alto, dado que la resolución espacial del patrón de uniformidad disminuirá a medida que aumenta el desplazamiento realizado entre ambas imágenes. En las medidas realizadas se desplaza una distancia de 2 mm, correspondiente a 44 píxeles.

En medidas de reflectancia espectral a través de MSI con el sistema descrito, ya se ha realizado la selección de puntos característicos que permitan la transformación geométrica entre las imágenes obtenidas con las doce cámaras (Figura 2.9). Por lo tanto, para obtener el patrón de iluminancia que permita calibrar uniformidad en la iluminación para las medidas de reflectancia con el sistema descrito es suficiente con tomar las imágenes $I_A(n,m)$ e $I_B(n,m)$ con una de las doce cámaras. Para la validación del método en las medidas realizadas se obtienen MSI en ambas posiciones con la cámara con filtro espectral de 510 nanómetros. La variación en niveles de gris entre las dos imágenes I_A e I_B obtenidas en cada posición será proporcional al cambio producido al desplazar la muestra o la fuente de iluminación. El procedimiento se describe de forma esquemática en la figura 2.18.

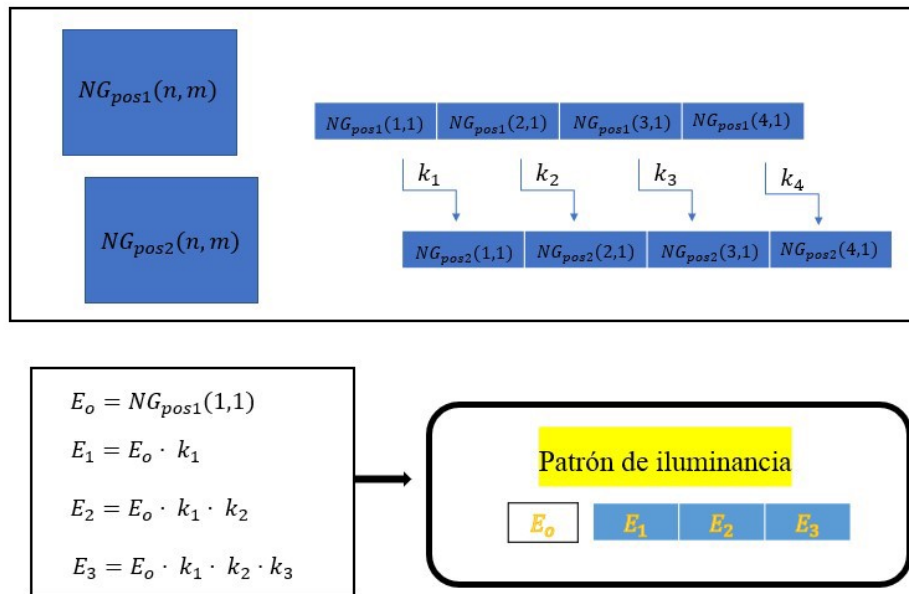


Figura 2.18: Esquema del algoritmo desarrollado para obtener el patrón de iluminancia.

La matriz $k(n,m)$ correspondiente al factor que incluye la variación de iluminación sobre la muestra se obtiene a partir de la razón entre las imágenes $I_A(n,m)$ e $I_B(n,m)$,

$$k(n,m) = \frac{I_A(n,m)}{I_B(n,m)}. \quad (2.8)$$

Para obtener el patrón de iluminación sobre la muestra, es necesario que exista una relación entre los píxeles de una columna (n) y la anterior ($n - 1$). Se obtiene cada fila o columna del patrón de uniformidad I_n ,

$$E_n = E_o \cdot (k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n), \quad (2.9)$$

donde la imagen de la tira de calibración es E_o , obtenida a través de la media entre los valores de sus 5 filas para que consista en una columna de píxeles.

Agrupando todas las columnas E_n en una matriz, se obtiene $E_{(n,m)}$, que corresponde al patrón de uniformidad de la iluminación en unidades de niveles de gris en cada píxel de la imagen de la muestra a analizar.

2.2.4. Resultados

A partir de las medidas realizadas, se obtiene la MSI de la pintura al óleo analizada en la posición inicial, $I_A(n,m)$, y la MSI $I_B(n,m)$ de la misma pintura en la posición en la que se ha desplazado la cámara con respecto a la muestra en sentido horizontal (Figura 2.19).

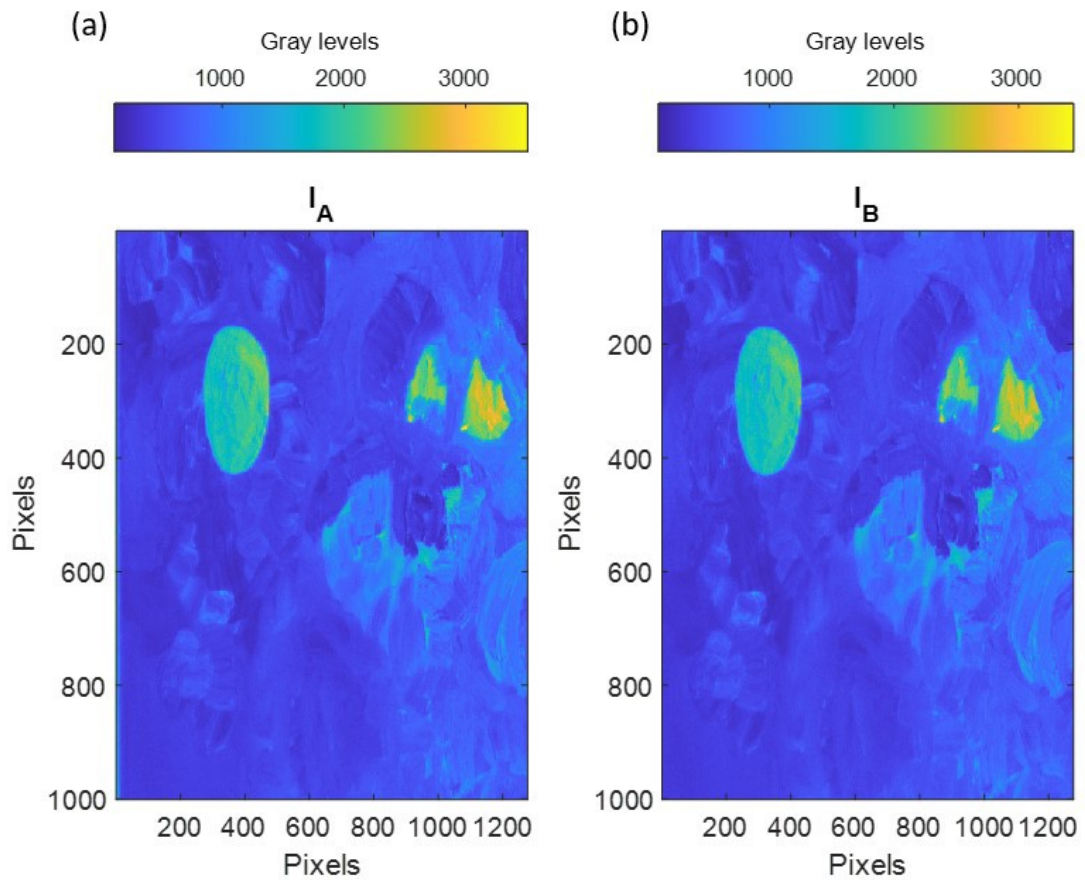


Figura 2.19: Imagen multispectral (MSI) a 510 nm de la pintura al óleo en la posición inicial A (a) y en la posición desplazada B (b).

Las imágenes $I_A(n,m)$ e $I_B(n,m)$ están desplazadas entre si 44 píxeles en horizontal. Sin embargo, debido a posibles imperfecciones o imprecisiones en el sistema de desplazamiento utilizado, es necesario considerar la posibilidad de que existan errores en el desplazamiento horizontal real. Para mitigar este problema, se realizó un cálculo de la medida entre cada veinte filas de las imágenes capturadas. Esta estrategia permite detectar y corregir cualquier desviación en el desplazamiento horizontal, asegurando así la precisión en los resultados obtenidos (Figura 2.20).

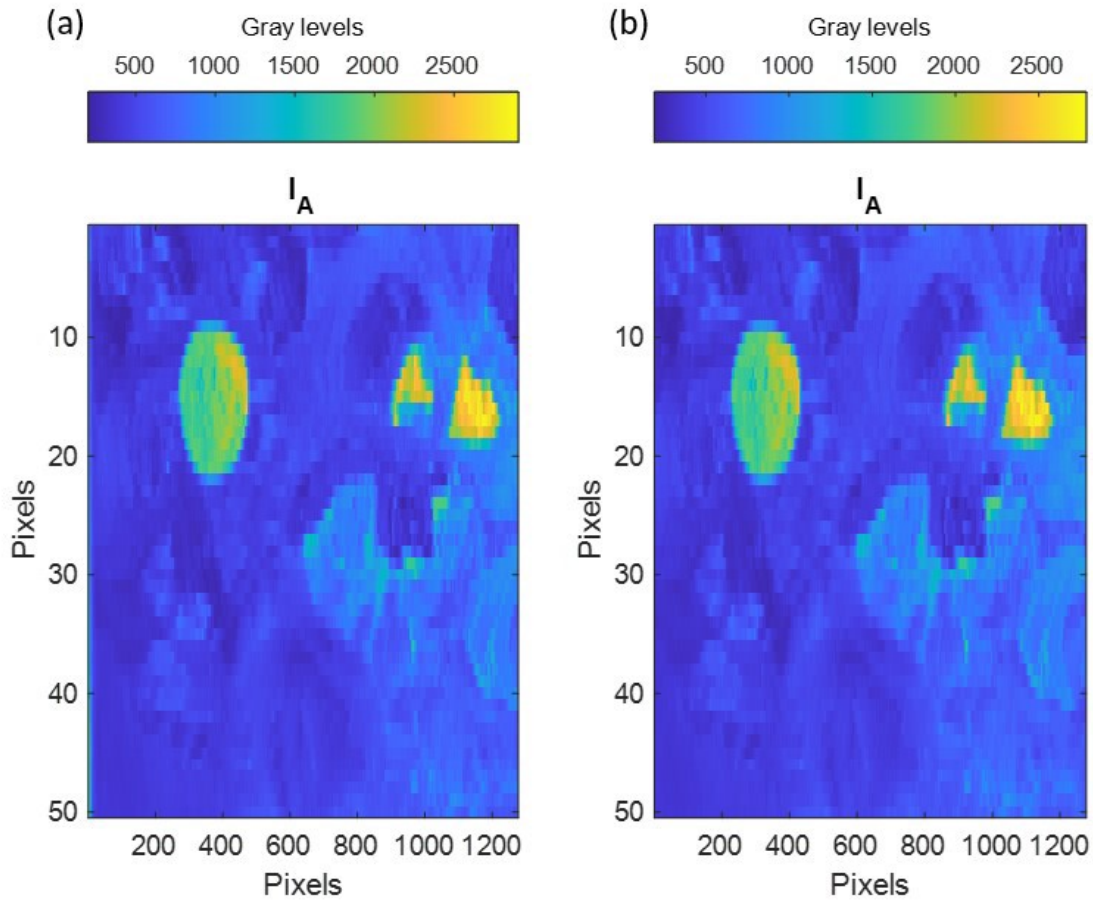


Figura 2.20: Imagen multispectral (MSI) a 510 nm de la pintura al óleo obtenida mediante el promedio de cada 20 filas, capturada en la posición A (a) y en la posición desplazada B (b).

A continuación, se realiza la razón entre las imágenes $I_A(n,m)$ e $I_B(n,m)$ para obtener la matriz $k(n,m)$, como se describe en la ecuación 2.8. Después, a partir del factor $k(n,m)$ obtenido e E_o , correspondiente al valor en niveles de gris de la tira de calibración correspondiente en $I_A(n,m)$, se obtiene E_n .

Por último, agrupando todos los valores de cada columna E_n en una matriz, se obtuvo la matriz $E_n(n,m)$ que incluye el patrón de iluminación en niveles de gris para la muestra correspondiente a la pintura al óleo y para la superficie uniforme (Figura 2.21a).

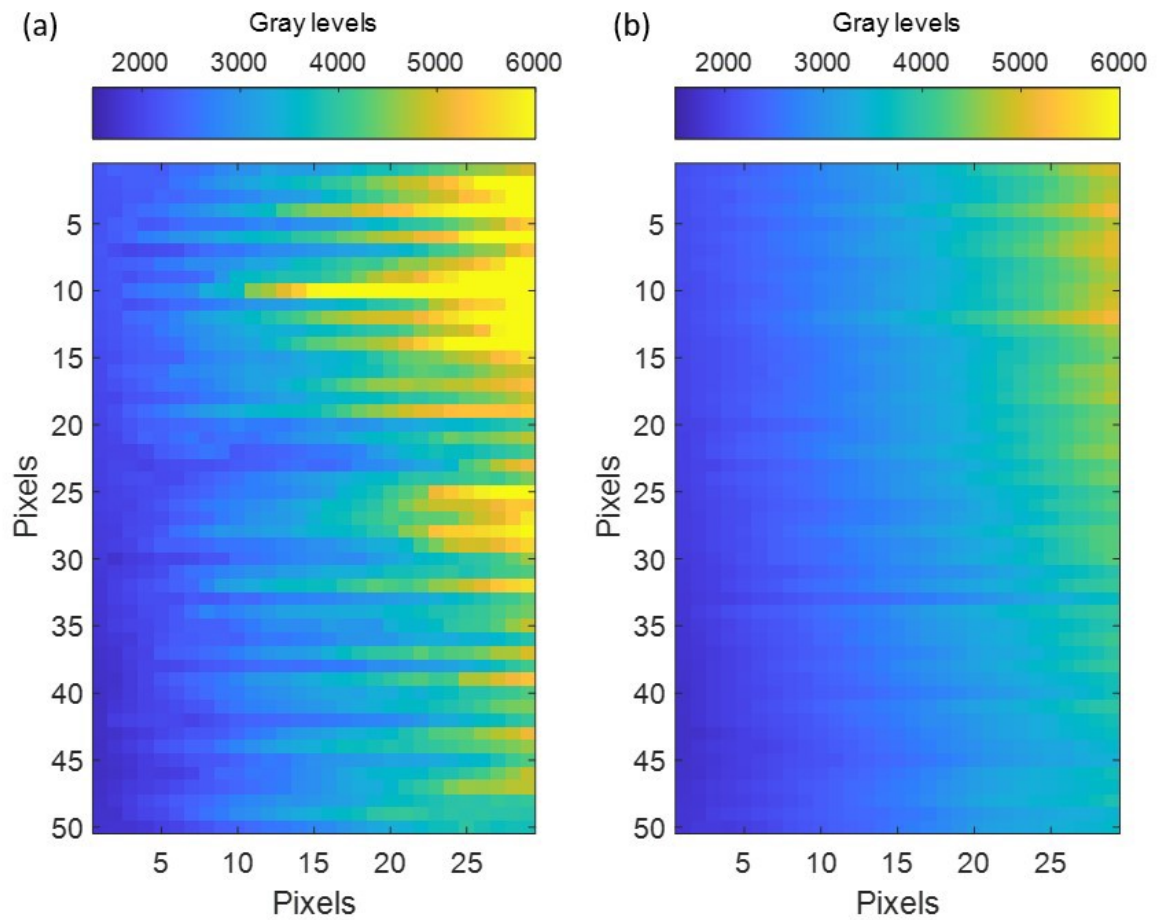


Figura 2.21: Patrón de iluminación obtenido a partir del algoritmo descrito utilizando la pintura al óleo como muestra (a) y una superficie de PVC espumado blanco y uniforme (b).

Para validar los resultados obtenidos, el patrón de uniformidad alcanzado de las medidas realizadas sobre el lienzo fue comparado con el patrón de uniformidad obtenido realizando las medidas tomando como muestra una plancha de PVC espumado de color blanco uniforme (Figura 2.21b). La diferencia promedio entre ambas situaciones se sitúa en el 12.59%, debido principalmente a errores experimentales ocasionados por imperfecciones en el sistema de desplazamiento utilizado, los cuales inducen un movimiento vertical durante las medidas.

2.3. Discusión

En este capítulo se ha presentado el diseño, desarrollo y validación de un sistema capaz de obtener imágenes multiespectrales (MSI) con alta resolución espacial desarrollado a partir de dispositivos económica y comercialmente accesibles. A partir de las MSI capturadas con este sistema, se ha descrito y validado un método de medida de reflectancia espectral HDR. A diferencia de las cámaras multiespectrales basadas en una rueda de filtros, el sistema desarrollado permite obtener MSI sin necesidad de mover los filtros espectrales en cada medición [29]. Aunque esta desventaja se supera con el uso de la tecnología de filtros sintonizables de cristal líquido (LCTF), tanto la tecnología LCTF como las ruedas de filtros obtienen imágenes de forma secuencial, afectando en ambos casos al tiempo de adquisición de la imagen [44]. El sistema descrito por Geelen et al. permite la captura de imágenes multiespectrales sin modificar la resolución temporal respecto a las imágenes RGB. Sin embargo, la resolución espacial del sensor utilizado se reduce a medida que aumenta la resolución espectral del sistema [57]. N. Genser et al. propusieron un sistema matricial MSI [58] que obtenía la reflectancia espectral utilizando imágenes de bajo rango dinámico. A diferencia de su sistema, en este estudio se utiliza la configuración matricial para obtener la reflectancia espectral HDR. Martínez et al. obtuvieron el parámetro de reflectancia espectral mediante imágenes hiperespectrales (HSI) HDR utilizando un escáner de línea hiperespectral [59]. Esta configuración presenta el inconveniente de que para evaluar toda la superficie de la pintura a analizar es necesario desplazar el escáner a lo largo de la misma. En este estudio, fue posible obtener la reflectancia espectral HDR mediante MSI con la precisión de cada píxel de la imagen capturada. Las mediciones descritas en este trabajo se realizaron en un laboratorio bajo condiciones de iluminancia suficiente en todas las áreas de la escena evaluada. Así, utilizando el tiempo de exposición que define el límite máximo de la zona de respuesta lineal del sensor, la señal en la zona de bajo rango dinámico (LDR) fue suficiente para obtener los valores de reflectancia. Sin embargo, al igual que en el análisis del cuadro de Goya *Retrato de Juan Martín de Goicoechea* [60], cuando se evalúa la reflectancia espectral de obras de arte, la iluminancia sobre la escena no es suficiente en las zonas de bajo rango dinámico, por lo que en este caso, utilizar MSI HDR para evaluar la reflectancia espectral es un requisito indispensable.

Por otro lado, dado que los pigmentos pueden encontrarse en cantidades muy pequeñas sobre las obras de arte para llevar a cabo su caracterización y segmentación es necesario utilizar métodos que permitan obtener información espectral con alta resolución espectral y espacial. Los sistemas comerciales de captura MSI y HSI no tienen suficiente resolución espacial para poder segmentar pigmentos en grandes obras de arte. Por lo tanto, aunque la fusión de HSI con MSI aumenta la resolución espacial de HSI, no es suficiente para realizar la segmentación del pigmento con precisión [48]. Se obtiene una resolución espacial adecuada fusionando HSI con imágenes RGB [49]. Los algoritmos de superresolución realizan un procesamiento a posteriori de la información de reflectancia espectral obtenida del HSI [61, 62]. La información obtenida permite una segmentación y posterior mapeo de los diferentes pigmentos utilizados en las obras de arte. Sin embargo, estos algoritmos no son capaces de dilucidar pequeñas cantidades de pigmento en pinturas o esculturas. Con el sistema de captura de MSI utilizado en esta investigación, ha sido posible obtener imágenes con resolución 4K.

Por otra parte, la calibración de la falta de uniformidad de la iluminación en medidas de reflectancia espectral de obras de arte es de gran importancia en el campo de la conservación y restauración de patrimonio cultural. El análisis científico de obras de arte es fundamental para comprender su composición, autenticidad y estado de conservación. La reflectancia espectral proporciona información crucial para este análisis. Sin embargo, la iluminación no uniforme puede afectar negativamente la calidad de las mediciones espectrales. Desarrollar técnicas de calibración funcionales para corregir la falta de uniformidad de la iluminación es importante porque garantiza mediciones precisas y fiables. Esto significa que los datos obtenidos serán más exactos y representativos de las características reales de la obra de arte. Al mejorar la precisión de las mediciones espectrales, los análisis serán más fiables, lo que permitirá una comprensión más precisa de los materiales, técnicas y condiciones de conservación de la obra de arte.

La utilización de una iluminación uniforme para calibrar la falta de uniformidad de la iluminación en medidas de reflectancia espectral es ampliamente aceptada debido a su capacidad para permitir comparaciones precisas entre MSI y HSI y obtener mediciones confiables de reflectancia espectral en obras de arte [38, 39, 40]. Sin embargo, este enfoque presenta desventajas importantes a considerar. Estas incluyen la imposibilidad técnica de lograr una iluminación uniforme en toda la

escena, la limitación en la flexibilidad para iluminar de manera uniforme áreas específicas, la posibilidad de alterar la apariencia visual de la obra de arte, lo cual puede ser problemático cuando se requiere una representación fiel de la escena, y la sensibilidad a las condiciones ambientales, como la presencia de luz adicional en el entorno. Como alternativa, la utilización de superficies de calibración para corregir la falta de uniformidad en la iluminación en medidas de reflectancia espectral ofrece varias ventajas. Estas incluyen la posibilidad de comparar MSI y HSI de manera precisa y coherente, ya que se corrigen las variaciones en la iluminación [41]. Además, permite eliminar artefactos no deseados en las imágenes, como sombras, brillos u otras irregularidades causadas por una iluminación no uniforme. Sin embargo, esta técnica resulta inviable para calibrar la falta de uniformidad en obras de arte de gran tamaño como son murales. La limitación física de la superficie de calibración dificulta su aplicación en estas obras, ya que resulta complicado adaptar una superficie plana de dimensiones equivalentes. El método propuesto representa un importante avance en la técnica de medición de reflectancia espectral mediante MSI y HSI, ya que permite calibrar la falta de uniformidad de iluminación sobre una muestra al variar brevemente su posición. Incluso en el caso de obras de arte que no pueden ser desplazadas, es posible llevar a cabo la calibración ajustando únicamente la posición de la fuente de iluminación. Esto ofrece una solución práctica y eficiente para obtener mediciones precisas de reflectancia espectral en una variedad de escenarios, lo que amplía las posibilidades de aplicación de la técnica en diferentes contextos y contribuye al avance en la investigación y conservación de obras de arte.

Capítulo 3

Caracterización y segmentación de pigmentos en obras de arte a partir de medidas de reflectancia espectral de alto rango dinámico. Caso de aplicación: *Dos figuras (1926)* de Salvador Dalí.

Las técnicas de restauración y conservación en el área del patrimonio cultural requieren el uso de tecnologías que permitan caracterizar los pigmentos que componen las obras de arte de manera precisa y no invasiva [63, 61, 64]. La caracterización de pigmentos que conforman una obra de arte en base a la reflectancia espectral, además de ser necesaria para implementar la técnica de restauración fotónica virtual, también permite realizar análisis más exhaustivos sobre su historia. El parámetro de reflectancia espectral de una obra de arte se puede utilizar para diferentes aplicaciones, por ejemplo, para caracterizar los pigmentos [28], para verificar la presencia de un pigmento en diferentes partes de la obra de arte a través de la segmentación de pigmentos [65, 66], para controlar y monitorizar el deterioro a lo largo del tiempo [67] o para verificar la autenticidad de las obras de arte [68], entre muchas otras aplicaciones.

Existen numerosas técnicas para la caracterización espectral de un pigmento, tanto microinvasivas como no invasivas. Gracias a los avances tecnológicos, ahora es posible realizar análisis exhaustivos de los pigmentos presentes en una obra de arte con una pequeña cantidad de muestra [69]. Incluso se han desarrollado técnicas que permiten la caracterización espectral de muestras con formas o distribuciones arbitrarias mediante el uso de esferas integradoras [70].

Por otro lado, con el objetivo de preservar la integridad de la obra de arte, especialmente aquellas con alto grado de fragilidad, se utilizan habitualmente las técnicas de análisis de imágenes. Entre estas técnicas destacan las imágenes hiperespectrales (HSI) y multiespectrales (MSI) y el uso de espectrofotómetros, entre otros. Los algoritmos de superresolución se utilizan ampliamente para realizar la segmentación de pigmentos de obras de arte [61, 62]. El objetivo de la segmentación de superresolución es obtener imágenes con información de alta resolución espacial a partir de imágenes de baja resolución espacial, basándose en una agrupación previa de píxeles con las mismas características espectrales [65, 62, 71]. A la hora de documentar y analizar obras de arte, la técnica de los gigapíxeles se utiliza mucho con las cámaras RGB, ya que las cámaras RGB comerciales permiten obtener imágenes con una alta resolución espacial [72]. La segmentación de pigmentos es una técnica que se puede ejecutar matemáticamente con la técnica HSI y el posprocesamiento. El posprocesamiento se utiliza en la segmentación porque puede producirse una segmentación excesiva o insuficiente [61]. Magro et al. [61] informaron que HSI redujo un 43 % la sobresegmentación en el algoritmo propuesto. Los diferentes pigmentos presentan diferentes características de reflexión, por lo que en el espectro visible podemos usar esta información para identificar pigmentos y normalizar la diferencia de reflectancia espectral en una base de datos que pueda identificar pigmentos. Este método fue utilizado por Li J. et al. [65] para caracterizar y segmentar los pigmentos en las cuevas de Mogao en Dunhuang.

Sin embargo, las propiedades colorimétricas de los pigmentos que componen las pinturas se alteran con el tiempo por la acción de la temperatura, la humedad y la exposición a la luz, entre otras cosas [73]. Además, dichos pigmentos se pueden mezclar entre sí, lo que altera sus propiedades de color y produce variaciones en la reflectancia espectral, dificultando su caracterización para llevar a cabo la segmentación [68]. Por lo tanto, para caracterizar y segmentar adecuadamente los pigmentos en una obra de arte, es necesario implementar técnicas y algoritmos que

consideren estas posibles mezclas de pigmentos, además de utilizar sistemas con una alta resolución espacial. La técnica mapeador de ángulo espectral ((SAM), por sus siglas en inglés) se usa a menudo en la segmentación de pigmentos. Consiste en identificar similitudes entre el perfil espectral de los pigmentos en una pintura y los de referencia que se han caracterizado previamente y están disponibles en una biblioteca [74, 75]. En su estudio, Deborah et al. realizó la segmentación de pigmentos de la pintura *El grito* de Edvard Munch utilizando un algoritmo basado en la divergencia espectral [76].

La pintura de Dalí *Dos figuras* (1926), ha sufrido cambios en su estado que alteran la apariencia original. Entre ellos, ha sufrido la transferencia de un pigmento rojizo proveniente de otras obras de arte (figura 3.1).

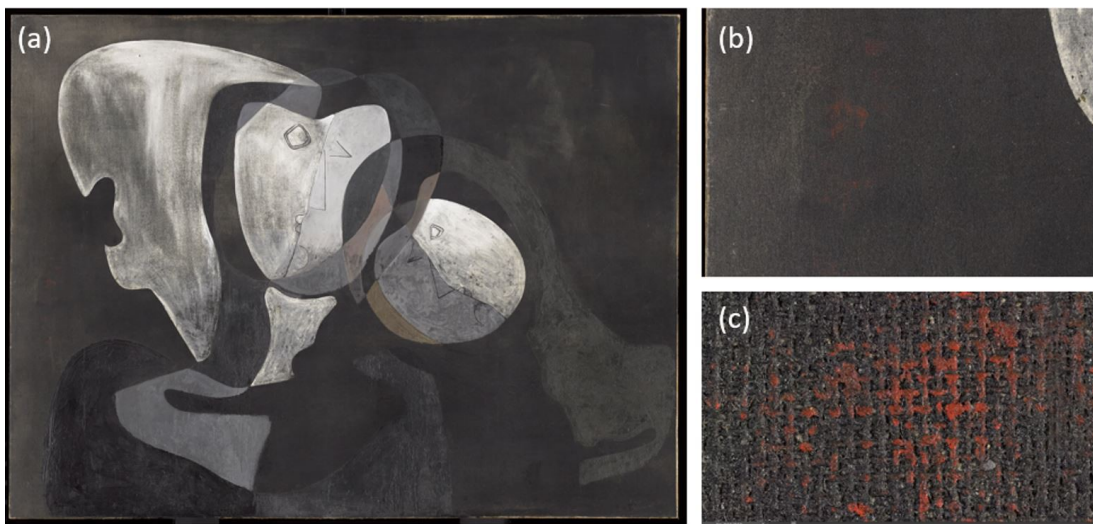


Figura 3.1: Imagen RGB de alta resolución espacial de la pintura de Dalí *Dos figuras* (1926) proporcionada por el MNCARS (a). Sección ampliada de un área de la pintura (b). Ampliación de una de las áreas afectadas por el área de la imagen de pigmento rojizo 6.8x4.9 cm (c).

En este capítulo se presenta una medición de reflectancia espectral de la pintura de Dalí *Dos Figuras* (1926) a partir de MSI HDR y resolución espacial 4K [77, 78]. A partir de estas medidas se desarrollan dos métodos para poder llevar a cabo la segmentación e identificación del pigmento incluyendo las variaciones debidas a las mezclas de pigmento [79, 66].

3.1. Medida de reflectancia espectral HDR de *Dos Figuras (1926)*

3.1.1. Configuración experimental y procedimiento de medida

La segmentación y localización de la zona de la pintura de Dalí *Dos figuras (1926)* afectada por el pigmento rojizo requiere una caracterización colorimétrica previa basada en la reflectancia espectral. Para la identificación de este pigmento se ha desarrollado el sistema de captura de MSI llamado Hypermatrixcam (*HYCAM*), cuya descripción se encuentra detallada en la sección 2.1. Este sistema permite obtener MSI con alta resolución espacial ya que está formado por 12 sensores RGB con resolución espacial 4K, dispuestos matricialmente [52]. Siguiendo las recomendaciones de la CIE [29] y de Fairchild [15] para medidas de reflectancia espectral bidireccional de obras de arte, se posicionó la fuente de iluminación a un ángulo de 45° con respecto a la pintura de Dalí y al sistema de captura de MSI empleado. Esta configuración permite obtener la máxima uniformidad evitando la reflexión especular sobre su superficie [29, 15] (Figura 3.2). Como fuente de iluminación para realizar las medidas se eligieron tres paneles array LED modelo ART LUX 500 L FLEX que en conjunto abarcan una extensión total de 1830 x 410 mm (horizontal x vertical). Estos paneles tienen una temperatura de color correlacionada de 5600 K, y cada uno de ellos proporciona una iluminancia de 2470 lux a 1 metro de distancia. La elección de la fuente de iluminación LED fue debida a la ausencia de radiación UV e IR en su emisión para evitar dañar la obra de arte [55].

Teniendo en cuenta que el campo de visión de *HYCAM* es de $23.4^\circ \times 20.5^\circ$ (horizontal x vertical) y las dimensiones de la pintura de Dalí de 1980 x 1490 mm, la distancia a la que se debe ubicar el sistema de captura de MSI con respecto a la pintura es de 4.8 m, dejando de este modo margen para colocar los patrones colorimétricos. Esta distancia para el sistema de medida permite obtener MSI del cuadro con una resolución de 3322 x 2510 píxeles (horizontal x vertical). Según la expresión $rh_{Dali} = S_{Dali}/MSI_{Dali} = 0.59$ mm, donde rh_{Dali} representa el tamaño del cuadro que se registra en cada pixel de la MSI obtenida, S_{Dali} es el tamaño de la pintura en milímetros y MSI_{Dali} el tamaño de la imagen obtenida en píxeles

(Figura 3.2).

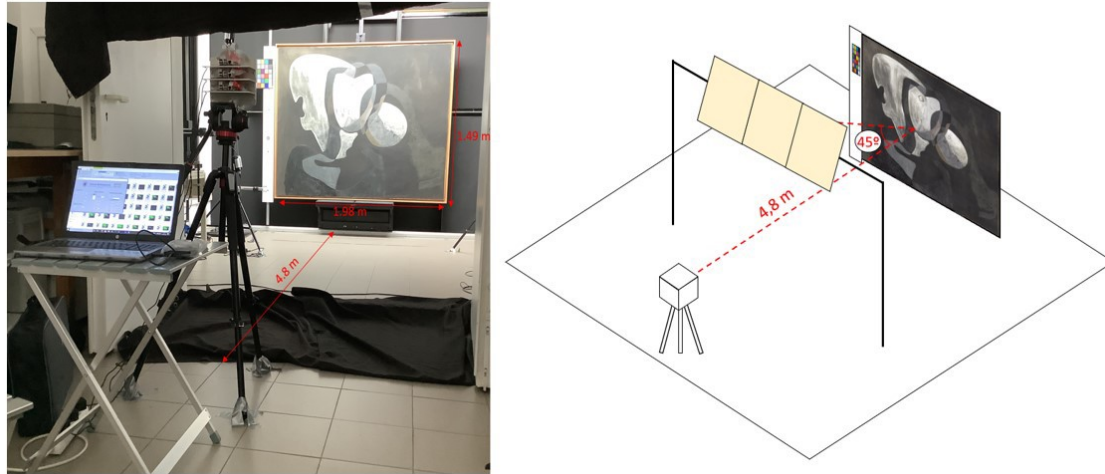


Figura 3.2: Esquema de la disposición geométrica y distancias utilizadas durante las mediciones de reflectancia espectral de *Dos figuras* de Dalí en el MNCARS.

Una vez establecida la configuración geométrica para las mediciones de reflectancia espectral, se calibró el sistema. Para ello, inicialmente se captura una imagen MSI sin la pintura utilizando como estándar de calibración una plancha de PVC espumado, un material uniforme con buenas propiedades difusas y con valor de reflectancia uniforme. La plancha de PVC tenía que ser de las mismas dimensiones de la pintura de Dalí para poder calibrar la no uniformidad del sistema de iluminación. La reflectancia media $\rho_{white}(\lambda)$ de este material se midió con un espectrofotómetro PR-655 (Photo Research Inc., Topanga, CA, USA) en la configuración geométrica 0-45° bidireccional [29]. La medida se realizó en dieciocho puntos equidistantes y se obtuvo un valor medio de reflectancia en la superficie de $\rho_{white}(\lambda) = 85.07 \pm 2.68 \%$.

3.1.2. Algoritmo para la obtención de imágenes multiespectrales HDR.

Esta pintura tiene zonas muy claras y oscuras en su superficie. Como se muestra en la Figura 3.3, las imágenes capturadas en un cierto tiempo de exposición da

como resultado píxeles que están fuera de la zona de linealidad del sensor, con píxeles saturados (amarillos) y subexpuestos (rosas) en la misma imagen.

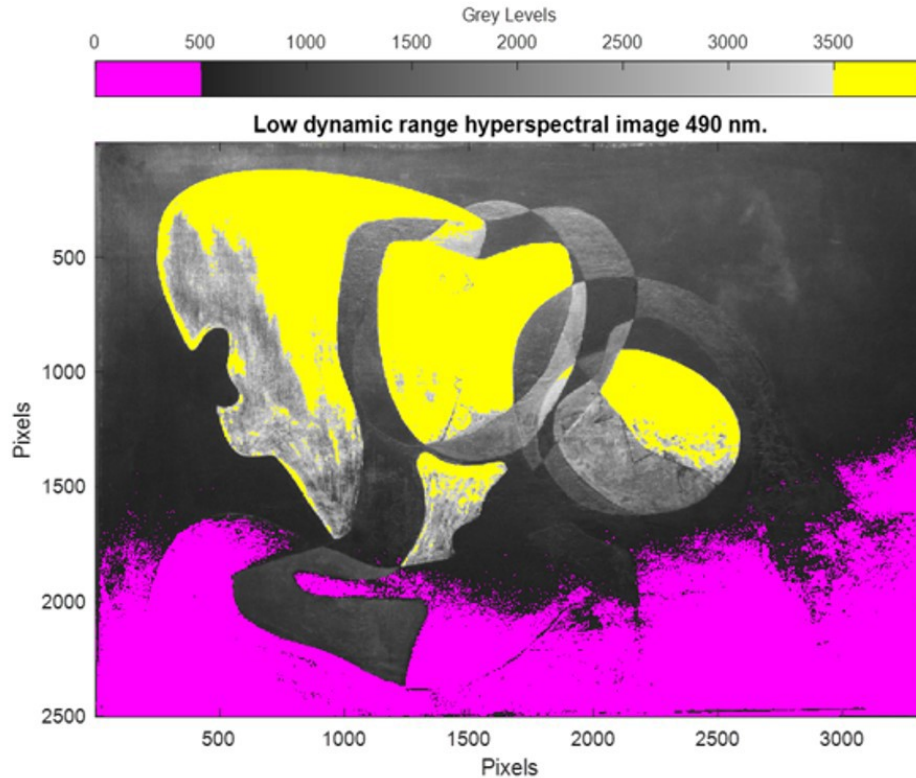


Figura 3.3: Imagen multiespectral LDR de *Dos figuras* (1926) a 490 nm con píxeles saturados (amarillo) y subexpuestos (rosa).

Con el fin de solventar este obstáculo, el sistema utilizado en este trabajo permitió obtener MSI HDR capturándolas en diferentes tiempos de exposición. Utilizando las imágenes LDR, se genera una imagen HDR a partir de la combinación de los niveles de gris en cada píxel que no están saturados o subexpuestos utilizando el algoritmo descrito en la sección 2.1.1. El sistema de adquisición MSI constaba de sensores RGB y filtros espectrales. La sensibilidad de los sensores RGB y la transmitancia de los filtros espectrales varían para cada longitud de onda, por lo que, para obtener suficiente señal en cada una de las longitudes de onda analizadas, las imágenes se capturaron con diferentes tiempos de exposición. Estos tiempos de exposición se seleccionaron ajustándolos para minimizar los valores de

píxeles saturados en cada uno de los intervalos del espectro de trabajo. El rango de tiempos de exposición elegido para longitudes de onda en el rango de 470 a 630 nm fue de 0.5 a 12.5 s en pasos de 3 s. Para longitudes de onda en el rango de 650 a 690 nm, el rango de tiempos de exposición fue de 8 a 20 s en pasos de 4 s. Después de obtener MSI HDR de la calibración, la pintura y la corriente oscura, la reflectancia espectral HDR $\rho_s(\lambda)_{(n,m)}$ en cada píxel (n, m) se calculó utilizando la ecuación 2.2.

3.2. Segmentación de pigmentos

A partir de las medidas de reflectancia espectral es posible realizar la segmentación de pigmentos de una obra de arte. En este caso, se describen y aplican dos métodos a la pintura de Dalí. Ambos métodos requieren procesar un cubo de reflectancia espectral con un iluminante estándar para obtener datos de color para el cálculo de las coordenadas CIELAB, a^* y b^* . Debido a la mezcla entre pigmentos y las alteraciones que sufren en sus propiedades colorimétricas a lo largo del tiempo la segmentación de dos pigmentos cuyos espectros de reflectancia son próximos entre sí se ve altamente dificultada [74]. Cuando se procesan los espectros de reflectancia de acuerdo con los valores de a^* y b^* , esta división sufre el mismo problema y el establecimiento de un límite de separación se vuelve bastante arbitrario. Para ayudar en el proceso de segmentación, necesitamos información adicional. Proponemos dos métodos que básicamente se enfocan en áreas de la imagen con predominio de un tipo de pigmento (negro o rojizo en este caso de aplicación).

3.2.1. Método 1: Segmentación inversa caracterizando un área negra sin transferencia de pigmento rojizo.

Debido a que la pintura de Dalí se ha contaminado de pigmento rojizo (Figura 3.1) en una zona del cuadro donde predomina el pigmento negro, el método 1 propuesto consiste en obtener datos representativos de a^* y b^* del pigmento negro usando un área de *Dos Figuras* que solo tenga pigmento negro. Si se segmenta este pigmento negro de acuerdo con los datos obtenidos, en una zona de pigmento negro y rojizo los píxeles restantes serán rojizos porque solo hay dos colores en este

área seleccionada. En este método, se puede definir un conjunto U con todos los datos a^*b^* de la zona de la pintura que tiene pigmento rojizo y pigmento negro,

$$U = \{a^* b^*\} \quad (3.1)$$

Adicionalmente, se puede definir un subconjunto Q ,

$$Q = \{a^* b^* \mid \text{pigmento negro}\}, \text{ con } Q \subseteq U, \quad (3.2)$$

donde Q es un subconjunto que contiene solamente pigmento negro CIELAB. En la práctica, esto define un límite cerrado β_{negro} con los datos a^*b^* del pigmento negro que permite una segmentación simple. Este proceso puede ser descrito matemáticamente del siguiente modo:

$$U/Q = R_{M1}, \quad (3.3)$$

donde R_{M1} es el subconjunto de datos que no son negros. Por lo que, en una zona bicolor de la pintura, rojo y negro, corresponde al pigmento rojizo con diferentes niveles de saturación.

3.2.2. Método 2: Segmentación basada en un área con alta incidencia de pigmento rojo.

Este método toma datos a^* y b^* de un área seleccionada fuertemente relacionada con el pigmento rojizo. La selección en otras áreas se realiza obteniendo datos que tienen a^* y b^* que están dentro del límite obtenido al analizar directamente el pigmento rojizo.

En este caso, cualquier subconjunto de imágenes de la pintura que solo tenga pigmento rojo se expresa como:

$$R_{M2} = \{a^* b^* \mid \text{pigmento rojizo}\} \quad (3.4)$$

donde el conjunto R_{M2} se obtiene seleccionando un área de nube de puntos con solo pigmento rojizo; luego, los datos a^*b^* están rodeados por un límite β_{rojizo} que encerrará todo el pigmento rojizo relacionado con el límite seleccionado. Así, es posible segmentar, en cualquier imagen con cualquier color, con estos datos establecidos para obtener la ubicación de dicho pigmento.

3.3. Resultados

3.3.1. Reflectancia espectral HDR de *Dos figuras (1926)*

El sistema de captura de MSI y el método utilizado para obtener la reflectancia espectral a partir de las imágenes adquiridas permiten obtener la reflectancia espectral de la pintura de Dalí con una alta precisión (Figura 3.4). A partir de esta técnica se ha logrado obtener la reflectancia espectral HDR de la pintura de Dalí *Dos figuras (1926)* con una resolución espectral de 12 longitudes de onda y una resolución espacial de 3322 x 2510 píxeles, con lo que se obtiene información de un área de 0.35 mm^2 de la pintura por cada píxel de la imagen adquirida (Figura 3.5).

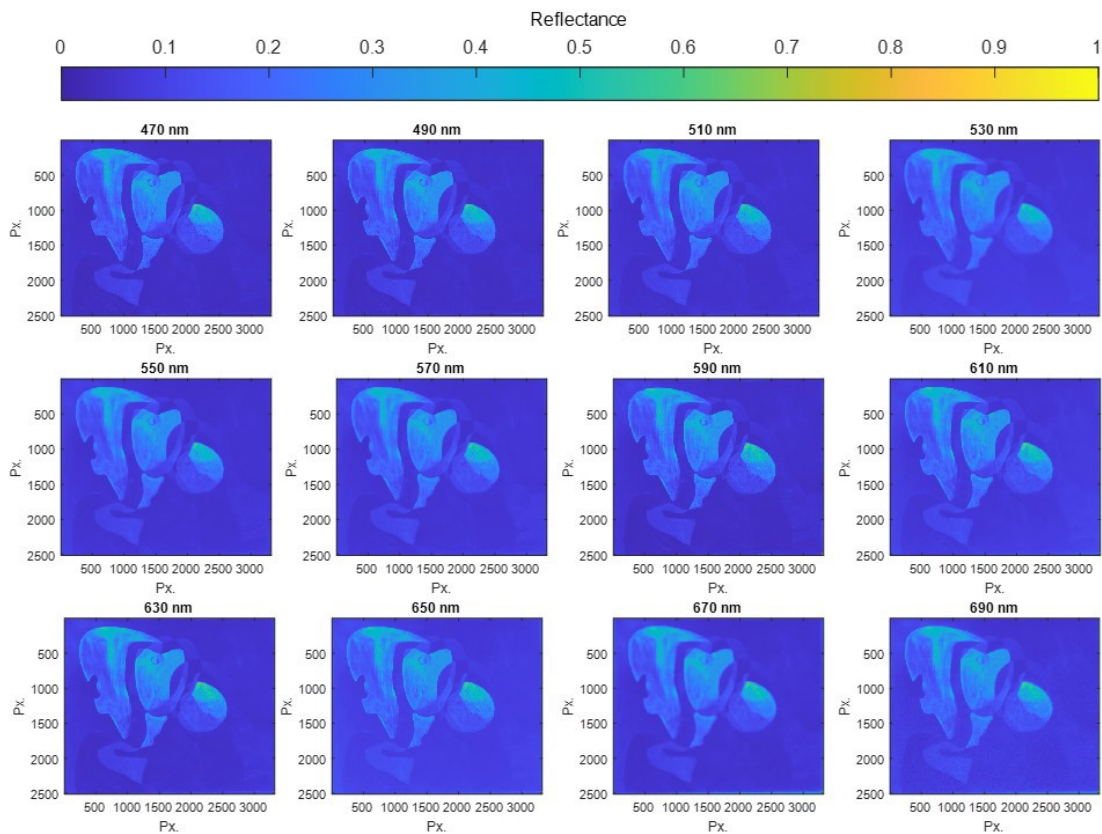


Figura 3.4: Reflectancia espectral HDR obtenida del cuadro de Dalí *Dos figuras (1926)* en el rango espectral entre 470 y 690 nm con pasos de 20 nm.

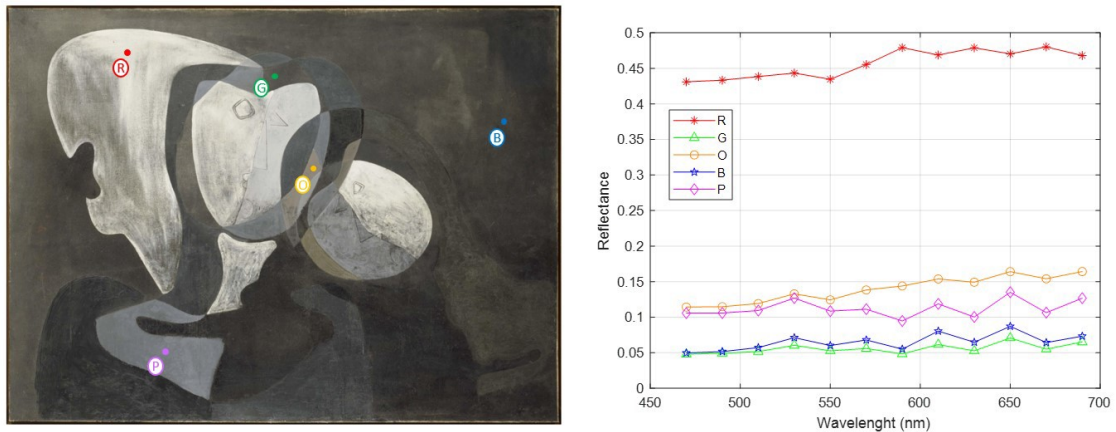


Figura 3.5: Reflectancia espectral de alto rango dinámico (HDR) en distintos puntos de *Dos figuras* (1926) de Dalí. En la imagen izquierda se visualiza la pintura de Dalí con puntos marcados, los cuales corresponden a la reflectancia espectral representada en la gráfica de la derecha.

3.3.2. Segmentación de pigmentos a partir de medidas de reflectancia espectral HDR

A partir de la información de reflectancia espectral, se lleva a cabo la segmentación del pigmento rojizo presente en la pintura de Dalí. La segmentación de dicho pigmento requiere su previa caracterización colorimétrica. Para ello, se ha seleccionado una zona de la pintura, de área 6.8×4.9 cm, donde está presente gran cantidad de pigmento y que denominaremos área de referencia 1. La figura 3.6a muestra una imagen RGB de alta resolución espacial gigapíxel correspondiente al área de referencia 1, mientras que la figura 3.6b muestra la misma área en el valor de reflectancia espectral HDR para la longitud de onda de 630 nm donde se detecta el pigmento rojizo como un área de píxeles con mayor reflectancia (amarillo en el mapa de falso color). En la figura 3.6c se muestra la imagen RGB obtenida a partir de las medidas de reflectancia espectral HDR.

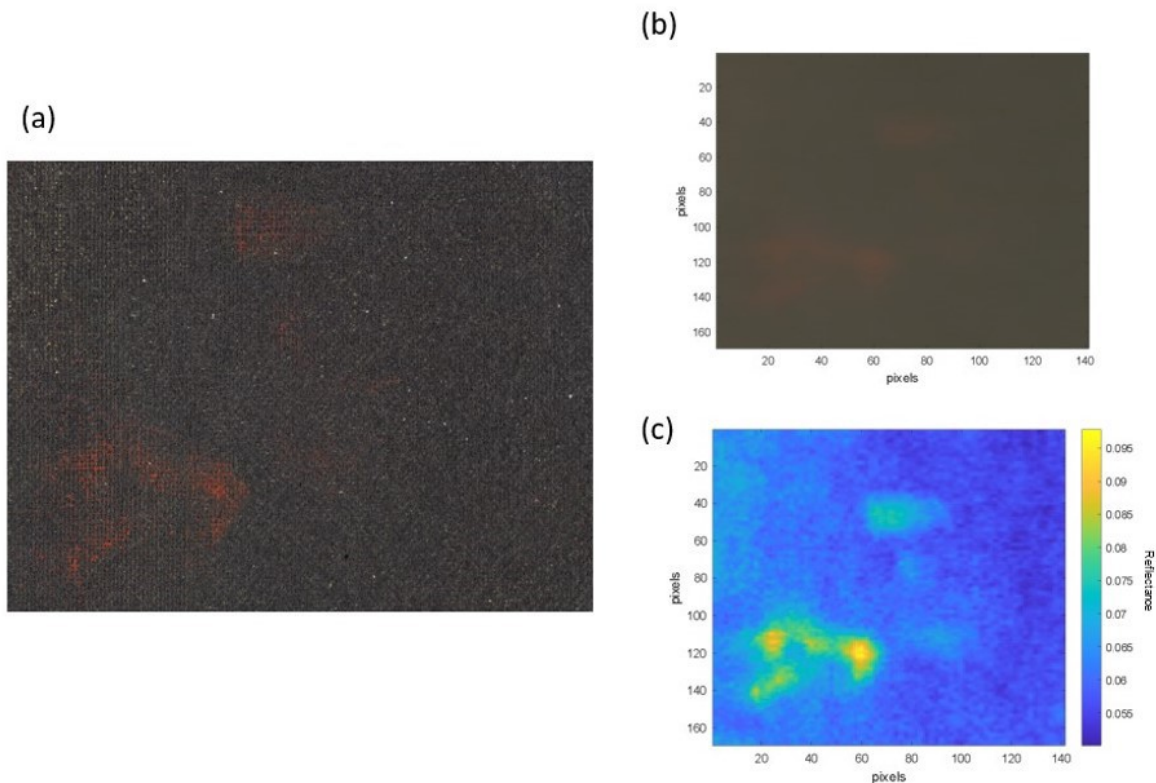


Figura 3.6: Imagen del área de referencia 1 para el análisis en una imagen RGB de alta resolución espacial (a), en una imagen RGB obtenida a partir de medidas de reflectancia espectral HDR (b) y en una imagen con información de reflectancia espectral 4K HDR a 630 nm (c).

Utilizando el iluminante A como referencia y un observador estándar CIE 1931, el primer paso consiste en calcular los valores triestímulo XYZ a partir del espectro de reflectancia $\rho(\lambda)_{(n,m)}$ de cada píxel del Área de referencia 1, (n,m) ,

$$X_{(n,m)} = k \int_{\lambda} \rho(\lambda)_{(n,m)} \bar{x}(\lambda) d\lambda, \quad (3.5)$$

$$Y_{(n,m)} = k \int_{\lambda} \rho(\lambda)_{(n,m)} \bar{y}(\lambda) d\lambda, \quad (3.6)$$

$$Z_{(n,m)} = k \int_{\lambda} \rho(\lambda)_{(n,m)} \bar{z}(\lambda) d\lambda, \quad (3.7)$$

donde la constante k se define para que el valor triestímulo Y sea 100 para un objeto cuyo valor de reflectancia o transmitancia espectral sea 1 en el espectro visible [15]. \bar{x} , \bar{y} y \bar{z} son las funciones de coincidencia del color o funciones de mezcla del color, que hacen referencia a las funciones de respuesta fotópica en valores triestímulo del observador estándar 2° CIE31.

A continuación, a partir de los datos triestímulo $XYZ_{(n,m)}$ se calculan las coordenadas a^* b^* del espacio CIELAB del área seleccionada (n,m) . En la figura 3.7 se muestran los datos $a^*_{(n,m)}$ y $b^*_{(n,m)}$. El aumento CIELAB en a^* es un estándar para el incremento del color rojo, se observa el ángulo de tonalidad que sigue al aumento en los componentes $a^*_{(n,m)}$ y $b^*_{(n,m)}$. El estudio de estos valores no define un delimitador, por ello, en esta investigación se proponen dos métodos que permite definir la segmentación entre ambos colores.

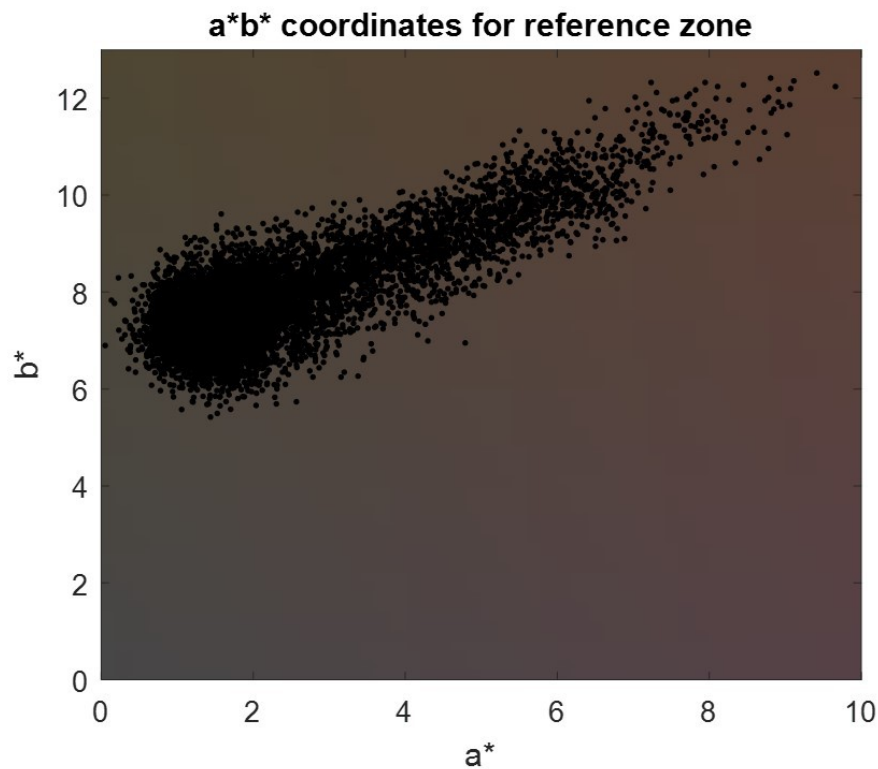


Figura 3.7: Representación gráfica de los valores a^*b^* de CIELAB del pigmento rojizo y el pigmento negro presente en el área de referencia 1.

Método 1. Segmentación inversa caracterizando un área negra sin transferencia de pigmento rojizo.

La segmentación analiza previamente una zona de la pintura con pigmento negro (Figura 3.8a) y se calculan sus componentes $a^* b^*_{(negro)}$ que forman una nube de puntos representada junto a su envolvente que permite segmentar el resto de los valores $a^* b^*$ presentes en la pintura (Figura 3.8b). El cálculo de la envolvente se ha realizado utilizando el comando *boundary* del programa MatLab.

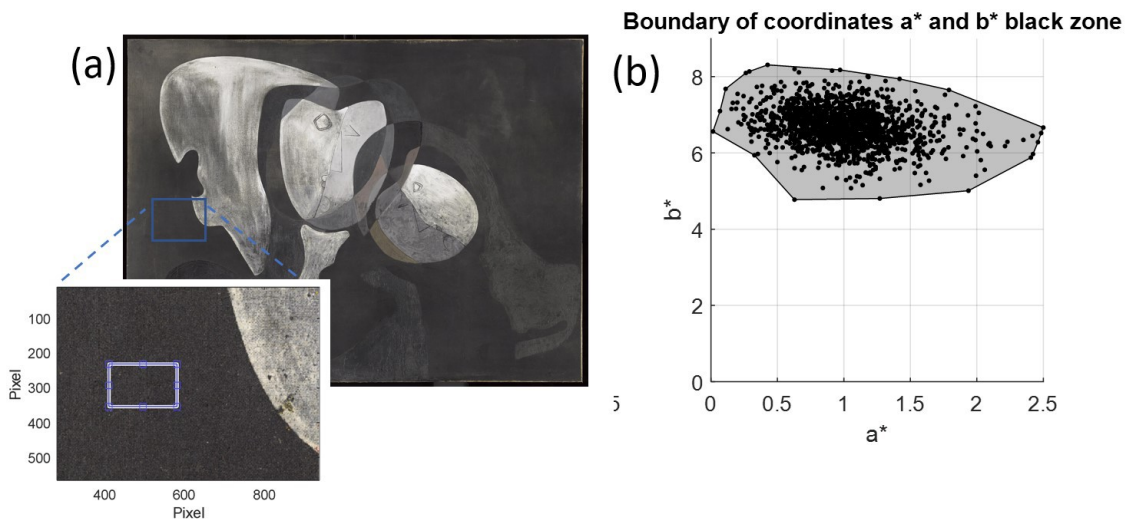


Figura 3.8: Área negra seleccionada para el análisis (a). $a^* b^*_{(black)}$ para el área negra, acotados por la envolvente (b).

Una vez definida la región con los valores $a^* b^*_{(negro)}$, se representan junto a la envolvente que acota los valores $a^*_{(n,m)}$ y $b^*_{(n,m)}$ del área de referencia 1 seleccionada para caracterizar el pigmento rojizo (Figura 3.9a). A continuación, utilizando el comando *subtract* del programa MatLab, se realiza la diferencia geométrica entre ambas regiones para definir la región con los valores $a^* b^*_{(rojizo1)}$ correspondientes al pigmento rojizo (Figura 3.9b).

Para validar el método se selecciona un área, denominada área de segmentación, de mayor tamaño que el seleccionado como referencia para el análisis. En la figura 3.10a se muestra el área de segmentación en una imagen RGB y en la figura 3.10b el área de segmentación en una imagen en falso color donde se representa

la reflectancia a 630 nm. Finalmente, la figura 3.10c muestra la segmentación de dicho pigmento rojizo presente en el área de segmentación.

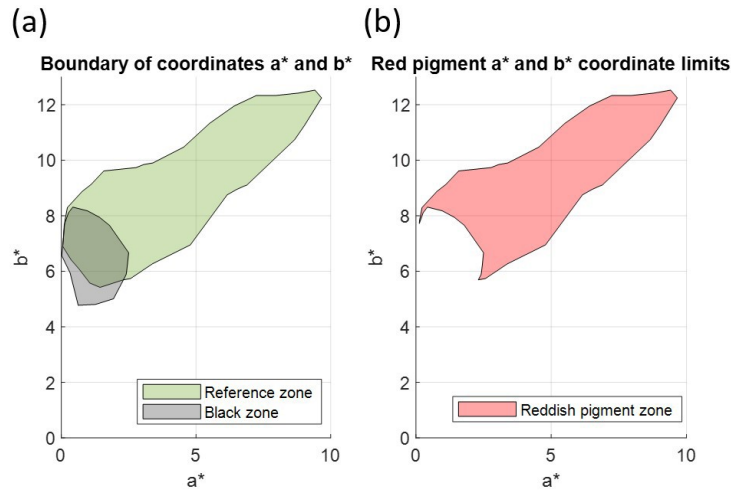


Figura 3.9: Representación gráfica de la región acordada con los valores a^*b^* _(negro) y con los valores $a^*_{(n,m)}$ y $b^*_{(n,m)}$ (a). Representación gráfica de la región acotada con los valores a^*b^* _(rojizo1) (b).

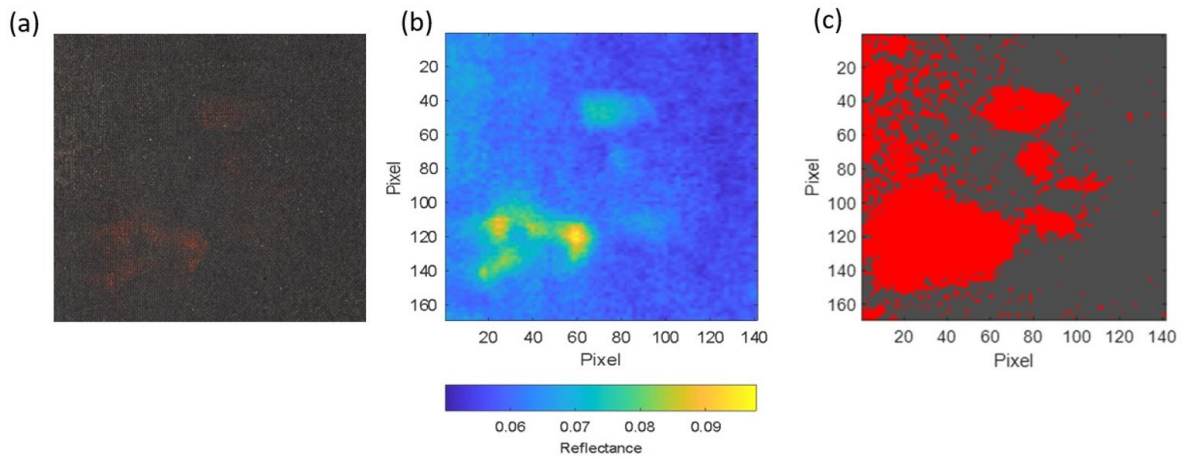


Figura 3.10: Imagen RGB área de segmentación (a). Imagen reflectancia área de segmentación a 630 nm (b). Segmentación del pigmento rojizo en el área de segmentación a partir de los valores a^*b^* _(rojizo1) (píxeles rojizos representados en falso color rojo) (c).

Método 2. Segmentación en base a una zona con gran incidencia del pigmento rojo.

En lugar de realizar la segmentación del pigmento rojizo a partir de la caracterización previa de un área negra, es posible realizar la segmentación del pigmento rojizo a partir de la reflectancia espectral HDR de un área que solamente presente gran incidencia de pigmento rojizo, denominado área de referencia 2. Este área tiene dimensiones de 11.76 x 8.26 mm en horizontal y vertical, respectivamente (Figura 3.11).

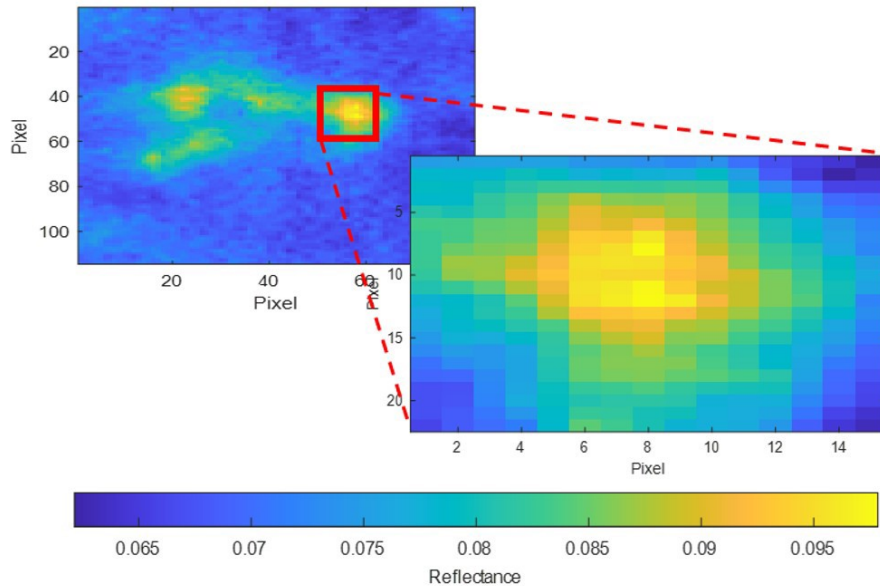


Figura 3.11: Imagen del área de referencia 2, con dimensiones de 11.76 x 8.26 mm (horizontal x vertical), mostrando datos de reflectancia espectral HDR a 630 nm.

Del mismo modo que en el método descrito en el apartado anterior, se obtienen las coordenadas $a^*b^*_{(rojizo2)}$ del área de referencia 2 tomando como iluminante de referencia el iluminante A y el observador estándar CIE 1931 a 2°. A continuación, se obtiene la región que acota los valores $a^*b^*_{(rojizo2)}$ y se representa junto a la región de los valores $a^*b^*_{(negro)}$ (Figura 3.12).

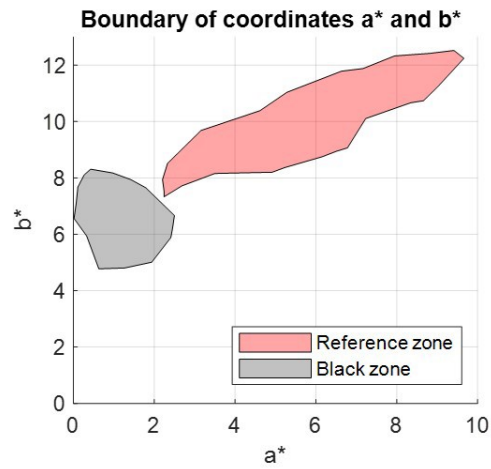


Figura 3.12: Representación gráfica de la región acordada con los valores $a^*b^*_{(negro)}$ y con los valores $a^*b^*_{(rojizo2)}$.

Puesto que ambas regiones no se solapan, se realiza directamente la segmentación sobre el área de segmentación en base a la región con los valores $a^*b^*_{(rojizo2)}$ (Figura 3.13).

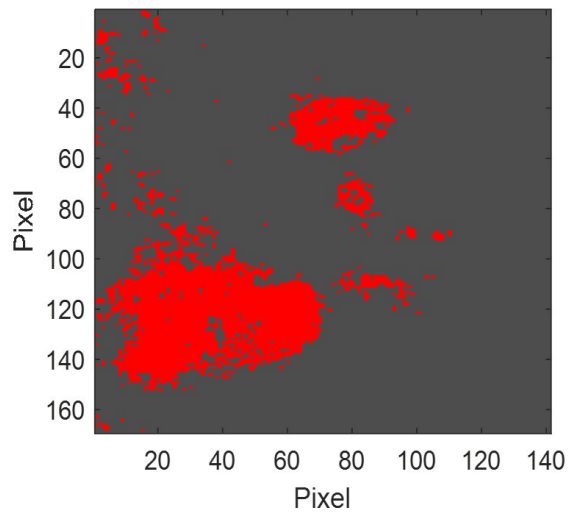


Figura 3.13: Segmentación del pigmento rojizo en el área de segmentación a partir de los valores $a^*b^*_{(rojizo2)}$ (píxeles rojizos representados en falso color rojo).

Análisis de ambos métodos

Los resultados obtenidos con ambos métodos se muestran en la tabla 3.1. A partir del método 1 se obtienen 4307 píxeles más que con el método 2, lo que equivale a un porcentaje de 18.07% del área de segmentación afectada.

Tabla 3.1: Análisis de los resultados obtenidos con los dos métodos de segmentación colorimétrica de pigmentos descritos.

Área de segmentación		Cantidad del área de segmentación afectada por el pigmento rojizo					
		Método 1			Método 2		
Píxeles	Área (cm^2)	Píxeles	Área (cm^2)	Porcentaje del área de segmentación	Píxeles	Área (cm^2)	Porcentaje del área de segmentación
23829	82.98	7611	26.49	31.94 %	3304	11.5	13.87 %

Para cada uno de los dos métodos propuestos, se calculó el valor medio de los espectros de reflectancia espectral de todos los píxeles incluidos en la segmentación. Los valores de reflectancia espectral de cada método se han procesado para obtener los valores RGB correspondientes al método 1 (Figura 3.14a) y al método 2 (Figura 3.14b).

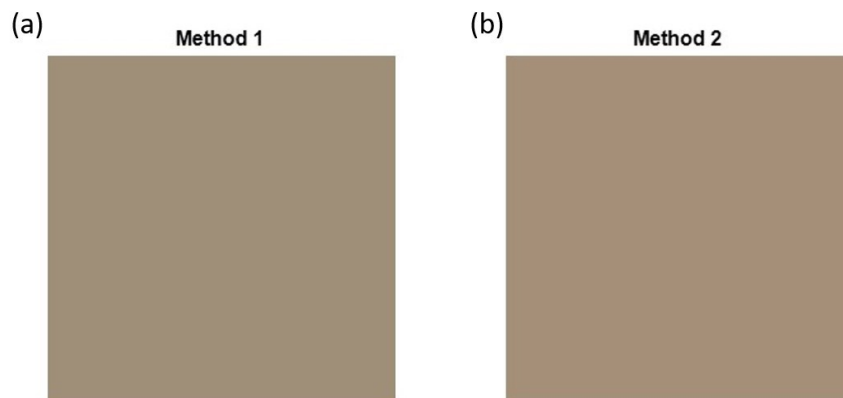


Figura 3.14: Representación del color del pigmento analizado cuyos valores RGB han sido obtenidos mediante el valor medio de la reflectancia espectral de los píxeles incluidos en la segmentación utilizando el método 1 (a) y el método 2 (b).

Inicialmente, los valores RGB se calcularon a partir de los valores triestímulo en las mismas condiciones de luminancia para cada método. Tanto para calcular los valores triestímulo como para convertir esos valores a RGB, se utilizó el observador estándar CIE 1931 2° y el iluminante A. Los valores RGB se han multiplicado por un factor 2 para aumentar su nivel de claridad y mejorar la apreciación visual del color.

3.4. Discusión

En este capítulo se han presentado las medidas de reflectancia espectral HDR para el cuadro de Dalí titulado *Dos figuras (1926)* y un análisis colorimétrico del pigmento rojizo que afecta a la pintura debido a la transferencia entre pigmentos. El pigmento está presente en diferentes partes de la pintura, y, en algunas de las zonas afectadas, ha sido mezclado con el pigmento negro de base, dificultando su identificación a través de nuestro sistema visual o a través de imágenes RGB. Para poder llevar a cabo el análisis con la resolución espectral y espacial suficiente, se utilizó el sistema descrito en la sección 2.1, dado que a partir de este sistema ha sido posible obtener información de reflectancia espectral con una precisión espacial de 0.35 mm^2 de la pintura de Dalí en cada píxel de la imagen obtenida, permitiendo caracterizar el pigmento rojizo presente en la pintura.

Debido a la dificultad para definir los umbrales entre un pigmento puro, sus mezclas y el resto de pigmentos, las técnicas de SAM y divergencia son interesantes para su uso en la segmentación de pigmentos [74, 75, 76]. Cuando se toma como referencia una librería espectral, permiten cuantificar la similitud entre un pigmento puro y sus mezclas. En este estudio, para la caracterización se utilizó el pigmento presente en la propia pintura y se evitó la comparación con bibliotecas espectrales de referencia. Además, antes de la segmentación, se utilizaron los dos métodos aquí propuestos para caracterizar el pigmento en sus estados puro y mezclado basándose en las coordenadas a^* y b^* , simplificando así el proceso. En el método 1, se realizó una segmentación que incluye zonas en las que el pigmento se había mezclado y que eran imperceptibles a simple vista. En el método 2 se realizó un análisis basado en las zonas más visibles, ya que la zona de referencia 2 es una zona de la pintura que contiene pigmento rojo puro.

La elección entre los métodos descritos anteriormente dependerá de las necesi-

dades de los expertos en restauración y conservación del patrimonio cultural, ya que la línea que delimita un pigmento no es clara; esto ocurre especialmente si se comparan los pigmentos rojos y negros presentes en la pintura de Dalí ya que en algunos casos pueden llegar a ser colorimétricamente similares entre sí. Como el pigmento está en la superficie de la pintura, la reflectancia no siempre está estrictamente relacionada con el pigmento añadido; esto se debe a que la capa de deposición es fina, y la reflectancia es una mezcla entre la capa original y la capa de pigmento añadido.

De este modo, la segmentación del pigmento tiene una limitación en el método 2 porque esta selección sólo obtiene una capa de pigmento grande. El método 1 puede seleccionar la capa más fina de rojo porque se obtiene mediante la exclusión del negro; esto sólo es útil si sólo hay negro y rojo. En el caso de aplicación de este cuadro de Dalí, la selección de interés del conservador es la zona más alta (Método 1); por tanto, todo él es pigmento que debe eliminarse porque es una transferencia de otro cuadro.

Capítulo 4

Algoritmo de optimización espectral de la iluminación para reducir el daño fotoquímico en la exposición en museos.

La exposición de obras de arte sin atender contra su conservación, requiere que se desarrollen nuevas técnicas y tecnologías que permitan una exposición más segura evitando que se produzcan daños sobre su superficie debido al efecto fotoquímico. La normativa CIE 157:2004 [25] presenta los modelos de daño con el fin de desarrollar una iluminación controlada sobre las obras de arte, sin embargo, hay más factores que influyen en el deterioro de un material de los que se consideran en la norma de la CIE, dado que existen una amplia variedad de materiales que componen las obras de arte con diferentes propiedades de absorción y reflexión [80]. Se han llevado a cabo diferentes estudios con el objetivo de desarrollar una iluminación optimizada para cada material utilizado en las obras de arte teniendo en cuenta el mayor número posible de variables que influyen en su deterioro. La mayoría de estas investigaciones examinan un número determinado de muestras bajo condiciones de iluminación controladas para así analizar cómo se produce el deterioro y poder establecer patrones comunes entre las diferentes muestras para poder determinar la iluminación adecuada que minimice el daño sin alterar la apariencia de las obras de arte [81, 82, 83, 80, 9]. Por otro lado, dado que es la

parte reflejada de la radiación la que nos llega a nuestros ojos y nos permite ver, se han realizado investigaciones que buscan optimizar la distribución del perfil espectral SPD de la iluminación incidente prescindiendo de las longitudes de onda que absorben en cada punto utilizando solo aquellas que son reflejadas por el objeto iluminado [84, 85, 86]. Esta técnica permite minimizar el daño fotoquímico sobre la obra de arte sin alterar su apariencia durante la exposición.

Al igual que el resto de obras de arte, resulta indispensable iluminar adecuadamente *Dos figuras (1926)* para ralentizar su deterioro. En el capítulo 3, se mostraron las medidas de reflectancia espectral de alto rango dinámico (HDR) de la pintura obtenidas mediante MSI. A partir de dichas medidas, se describe el desarrollo de una iluminación optimizada para que sobre cada punto de la pintura se minimice el daño fotoquímico al mismo tiempo que se conserva su apariencia en comparación con la iluminación del iluminante estándar D65.

4.1. Material y métodos

4.1.1. Configuración experimental y procedimiento de medida

Durante la exposición de la pintura de Dalí, *Dos figuras (1926)*, en el Museo, es necesario mantener su apariencia; por lo tanto, se requiere desarrollar una iluminación que no solo permita la exposición de la obra de arte reduciendo el daño fotoquímico, sino que además conserve su aspecto durante la exposición. Es decir, el valor de diferencia de color ΔE_{ab}^* en comparación con la iluminación estándar no debe ser mayor que 3 [16]. La percepción del color depende de la radiación del espectro visible reflejada por un objeto $\phi(\lambda)$, que, como se indica en la ecuación 1.14 mostrada en la introducción de esta tesis doctoral, corresponde al producto entre la reflectancia espectral del propio objeto $\rho(\lambda)$ y del perfil espectral incidente sobre él $SPD(\lambda)$.

Conociendo la reflectancia espectral de la pintura de Dalí es posible diseñar la iluminación adecuada que permita su exhibición reduciendo el daño debido al efecto fotoquímico sobre su superficie. El diagrama de flujo que se muestra en la figura 4.1 describe el procedimiento que se llevará a cabo en este capítulo para obtener el perfil espectral adecuado sobre cada punto de la obra de arte.

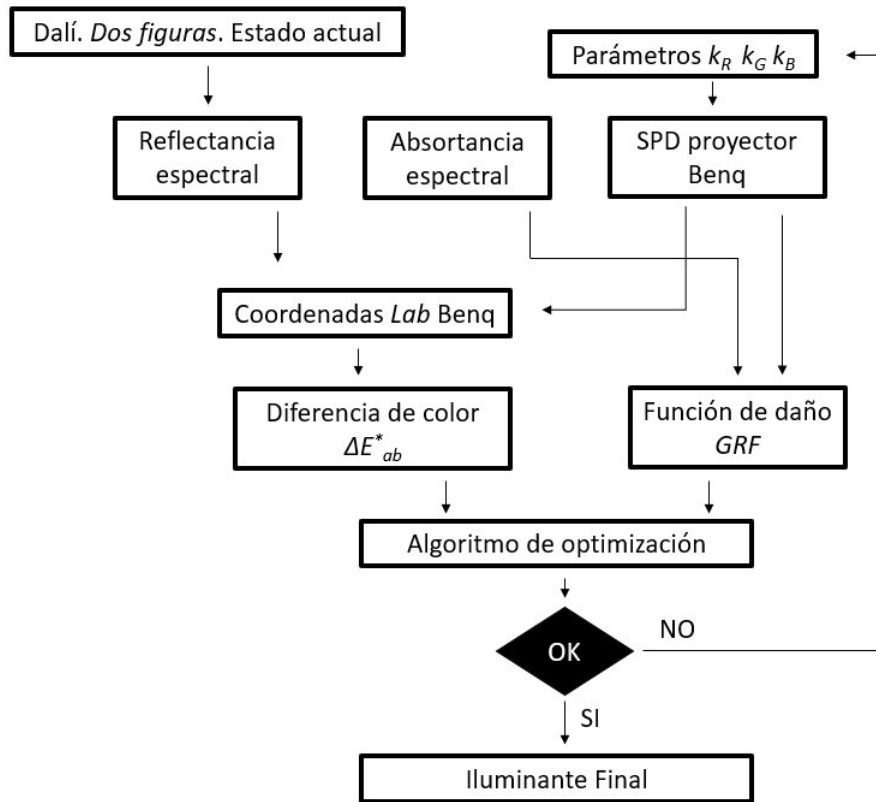


Figura 4.1: Diagrama de flujo en el que se describen los pasos del proceso de optimización del perfil espectral de la iluminación desarrollada para reducir el daño fotoquímico en la exposición de *Dos Figuras (1926)*.

Las medidas de reflectancia espectral HDR de la pintura de Dalí $\rho(\lambda)_{dali}$ descritas en el capítulo 3, se obtuvieron utilizando una cámara multispectral capaz de obtener MSI HDR. La cámara fue desarrollada ad-hoc para esta aplicación y permitió obtener la reflectancia espectral con resolución espacial de 3322 x 2510 (H x V) y con información espectral cubriendo el rango del espectro visible desde 470 a 690 nanómetros en pasos de 20 nm con espectro continuo dado que los filtros espectrales del sistema desarrollado tienen un ancho de banda de 10 ± 2 nm (Figura 4.2).

A partir de las medidas de reflectancia espectral es posible diseñar un sistema de iluminación que minimice el daño causado por la absorción de la radiación por parte de los pigmentos y sustratos que componen la obra de arte sin variar su

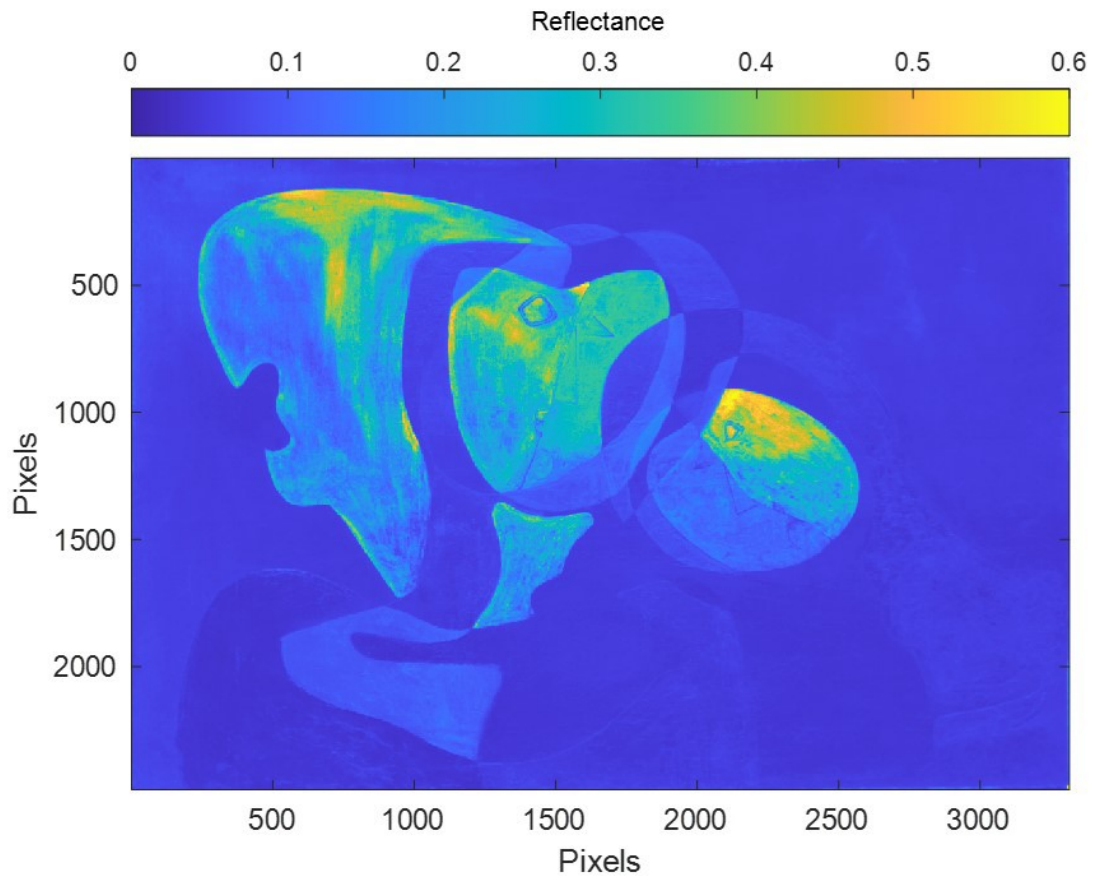


Figura 4.2: Reflectancia espectral HDR de la pintura de Dalí *Dos figuras (1926)* a 490 nm.

apariciencia. Teniendo en cuenta la alta resolución espacial de las medidas de reflectancia espectral obtenidas, es necesario que el sistema de iluminación utilizado para el diseño de la iluminación no solo permita la optimización del perfil espectral de la iluminación, sino que, además, debe tener también alta resolución espacial para así conseguir optimizar el perfil espectral con la mayor precisión posible. Para ello, se seleccionó el proyector láser Benq LK-952 que cuenta con una resolución espacial 4K. La distribución del perfil espectral de la fuente de iluminación del proyector láser Benq LK-952 utilizado se caracterizó mediante un espectrofotómetro PR-655 (Photo Research Inc., Topanga, CA, USA), utilizando una muestra patrón de Spectralon con valor de reflectancia espectral de 0.75 calibrado por el laboratorio Labsphere y prácticamente acromático en el rango del espectro visible

(Figura 4.3).

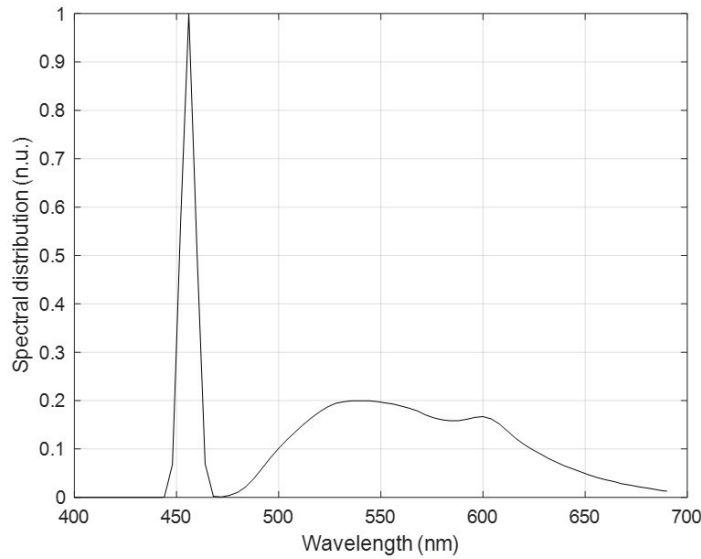


Figura 4.3: Distribución espectral del proyector láser Benq LK-952.

4.1.2. Función de mérito

A través de una función de mérito Q se pueden obtener los valores óptimos, sean mínimos o máximos, de una función objetivo. En el contexto de esta investigación se quiere diseñar un perfil espectral optimizado sobre cada punto de la pintura que permita iluminar la obra de arte sin alterar su apariencia y que además reduzca el daño fotoquímico sobre su superficie, en ambos casos con respecto al perfil espectral del iluminante estándar D65 de la CIE, SPD_{D65} .

Para ello, la función de mérito desarrollada a través del software MatLab, está formada por dos términos: una destinada a minimizar el daño D a partir del modelo de Berlín, y otra cuyo objetivo es minimizar la diferencia de color ΔE_{ab}^* , calculada en el espacio de color CIELAB (ecuación 4.1). Tanto D como ΔE_{ab}^* han sido calculados entre la pintura iluminada con el iluminante D65 y la fuente de iluminación optimizada.

En una función de mérito, se pueden establecer coeficientes conocidos como pesos ω , los cuales determinan la influencia de cada término en la optimización de la función global Q ,

$$Q = \omega_1 D + \omega_2 \Delta E_{ab}^* \quad (4.1)$$

donde ω_1 determina el impacto de la función de daño D y ω_2 determina el impacto de la función que controla la diferencia de color ΔE_{ab}^* .

De ese modo, siendo SPD_R , SPD_G y SPD_B los perfiles espectrales para el canal rojo, verde y azul del proyector, respectivamente; la función de mérito Q da como resultado los valores multiplicadores κ_R , κ_G y κ_B . Estos valores multiplicadores ajustan el $SPD(\lambda)$ de cada canal para lograr la iluminación óptima en términos de apariencia y daño en cada punto de la obra de arte.

$$\rho(\lambda)_{dali} SPD_{D65} = \rho(\lambda)_{dali} (\kappa_R SPD(\lambda)_{pR} + \kappa_G SPD(\lambda)_{pG} + \kappa_B SPD(\lambda)_{pB}), \quad (4.2)$$

Función de daño

En esta investigación el valor ω_1 de la función de mérito Q hace referencia al daño causado por la iluminación. El modelo de Berlín recogido en la norma CIE 157:2004 y descrito en la sección 1.4 de la introducción de esta tesis doctoral, permite desarrollar una fuente de iluminación atendiendo al SPD de la fuente de iluminación utilizada, la responsividad de cada tipo de material en cada rango espectral $S(\lambda)$ y a la absorptancia del objeto iluminado α . A partir de esto, en esta investigación se determina cuan de dañina es la iluminación determinada a partir del cálculo del valor *Global Risk Factor* (GRF) [81, 87],

$$GRF = \frac{\text{sum}(I_p(n,m,\lambda) \alpha(n,m,\lambda)_{Dali} S(\lambda))}{\text{sum}(I_{D65}(n,m,\lambda) \alpha(n,m,\lambda)_{Dali} S(\lambda))} \quad (4.3)$$

donde $I_p(n,m,\lambda)$ es la iluminación desarrollada, $I_{D65}(n,m,\lambda)$ es la iluminación del iluminante D65, $\alpha(n,m,\lambda)_{Dali}$ es la absorptancia de la obra de Dalí, y $S(\lambda)$ se obtiene con un valor de $b = 0.0115$ propuesto en la norma CIE 157:2004 para iluminaciones de pinturas al óleo sobre lienzos,

$$S(\lambda) = e^{[-b(\lambda-300)]}, \quad (4.4)$$

De este modo, un valor de $GRF = 1$ indicaría que ambas iluminaciones ejercen el mismo daños sobre la pintura. Puesto que conocemos la reflectancia espectral

de la pintura de Dalí $\rho(n,m,\lambda)_{Dali}$ y el perfil espectral de la iluminación incidente, $SPD(\lambda)_i$, es posible conocer la absortancia $\alpha(n,m,\lambda)_{Dali}$,

$$\alpha(n,m,\lambda)_{Dali} = SPD(\lambda)_i - \rho(n,m,\lambda)_{Dali} \quad (4.5)$$

Al tratarse de un material prácticamente opaco, se asume que la parte de la radiación que no es reflejada, es absorbida. Dado que la radiación absorbida por los objetos iluminados es la que genera daño fotoquímico, conocer el valor de la absortancia espectral ayuda a identificar la sensibilidad de la obra de arte a diferentes longitudes de onda.

Función de diferencia de color

Además de diseñar una iluminación que reduzca el daño fotoquímico sobre la obra de arte, es fundamental que su apariencia durante su exposición no se vea comprometida. En este sentido, en el desarrollo del perfil espectral optimizado se tiene en cuenta la diferencia de color ΔE_{ab}^* a partir del valor ω_2 de la función de optimización Q .

Para llevar a cabo este proceso, a partir de la reflectancia espectral de la pintura de Dalí $\rho(n,m,\lambda)$ y del perfil espectral de emisión del proyector $SPD(n,m,\lambda)_p$ se obtiene, el perfil espectral reflejado $I(n,m,\lambda)_p$ sobre cada píxel de la obra de arte n y m ,

$$I(n,m,\lambda)_p = \rho(n,m,\lambda) SPD(n,m,\lambda)_p. \quad (4.6)$$

A continuación, $I(n,m,\lambda)_p$ permite obtener los valores triestímulo XYZ_p para la iluminación con el proyector. En ambos casos, para obtener \bar{x} , \bar{y} y \bar{z} presentes en las ecuaciones, se utiliza como referencia un observador estándar CIE 1931. Finalmente, con los valores triestímulo XYZ_{LED} y XYZ_p obtenidos, se puede determinar las coordenadas cromáticas $L_p^* a_p^* b_p^*$ del espacio de color CIELAB mediante las cuales, se calcula la diferencia de color ΔE_{ab}^* con respecto al iluminante D65, a partir de la ecuación 1.22 mostrada en la sección 1.3.3.

4.2. Resultados

El algoritmo de optimización descrito ha permitido obtener un sistema de iluminación optimizado espectralmente que al proyectarlo sobre la pintura de Dalí permite reducir el daño de cada píxel sin variar la apariencia de esta con respecto a la iluminación del iluminante estándar D65. El perfil espectral de la matriz de iluminación ha sido diseñado para que cada punto de la pintura de Dalí reciba la iluminación óptima. Debido a que el desarrollo de la matriz de iluminación se basa en las medidas de reflectancia espectral descritas en el capítulo 3, su resolución espacial coincide con la de estas medidas, es decir, 4K (3322 x 2510 px).

Para obtener esta iluminación, el algoritmo de optimización se ha basado en una función de mérito, cuyos resultados se presentan en la gráfica para un píxel (Figura 4.4).

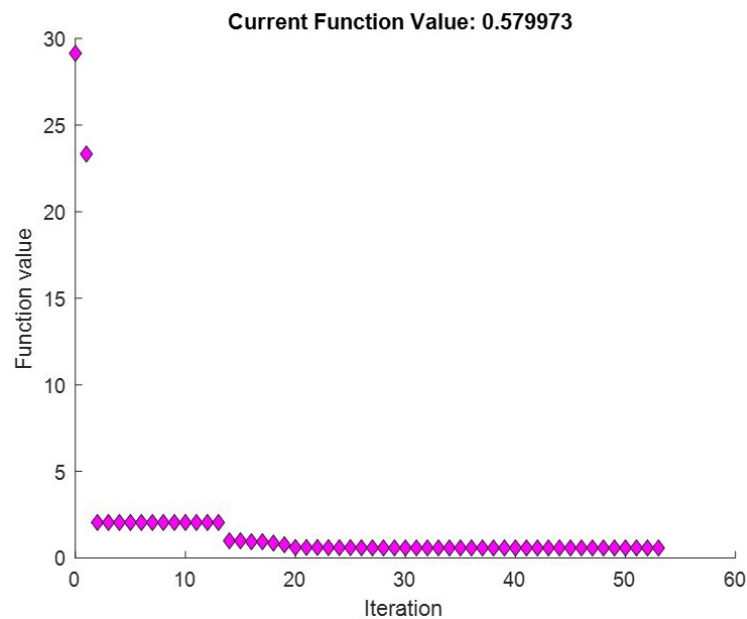


Figura 4.4: Representación de la convergencia de la función de mérito con un máximo de 75 iteraciones durante el proceso de optimización para un píxel.

Mediante la comparación de la iluminación desarrollada con la iluminación del iluminante D65, se ha determinado que la iluminación desarrollada reduce el daño fotoquímico sobre la obra en un 84.3%. En su punto máximo, la matriz de

iluminación obtenida disminuye el daño en un 85.3 % y en un valor mínimo 82.7 %. Además, la iluminación desarrollada no compromete la apariencia de la obra de arte durante su exposición, ya que el valor de diferencia de color con respecto a la iluminación del iluminante D65 es de 0.4891 como valor medio y un porcentaje de 0.1027 de la extensión total de la obra de arte tiene un valor de ΔE mayor que 1. Dado que un valor de ΔE menor de 1 es imperceptible por el ojo humano se puede asumir que la visualización de la obra de arte tras ser iluminada con la iluminación desarrollada sería correcta [16].

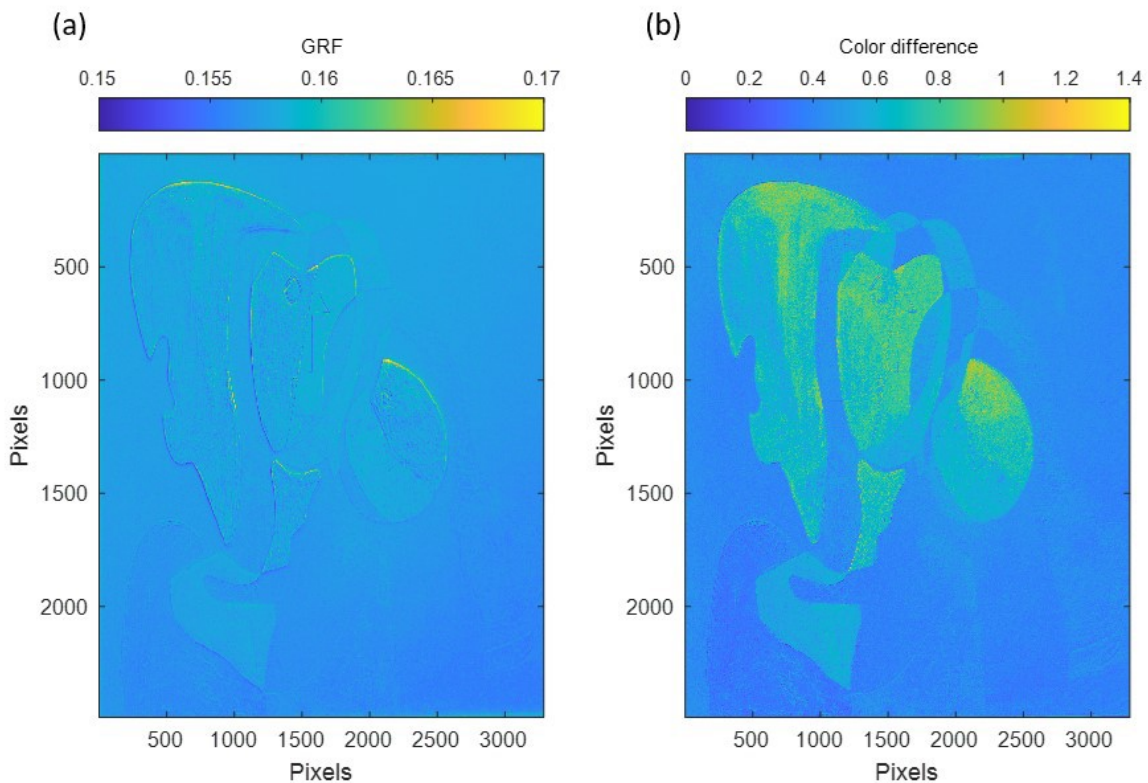


Figura 4.5: Resultados en: Factor de Daño, GRF, sobre cada píxel de la pintura al iluminarla con la iluminación desarrollada en comparación con el iluminante D65 (a). Diferencia de color, ΔE^*_{ab} , al iluminar la pintura con la iluminación desarrollada en comparación con la iluminación del iluminante D65 (b).

Con el fin de comprobar la matriz de iluminación desarrollada para cada punto de la superficie de la pintura, se realiza una simulación que permita comprobar

cómo se vería la obra de arte si fuera iluminada con el perfil espectral diseñado. Dado que se conoce el perfil espectral que se proyectara sobre su superficie y el valor de su reflectancia espectral, utilizando el software MatLab es posible representar los valores *RGB* sobre cada punto de la obra de arte (Figura 4.6).

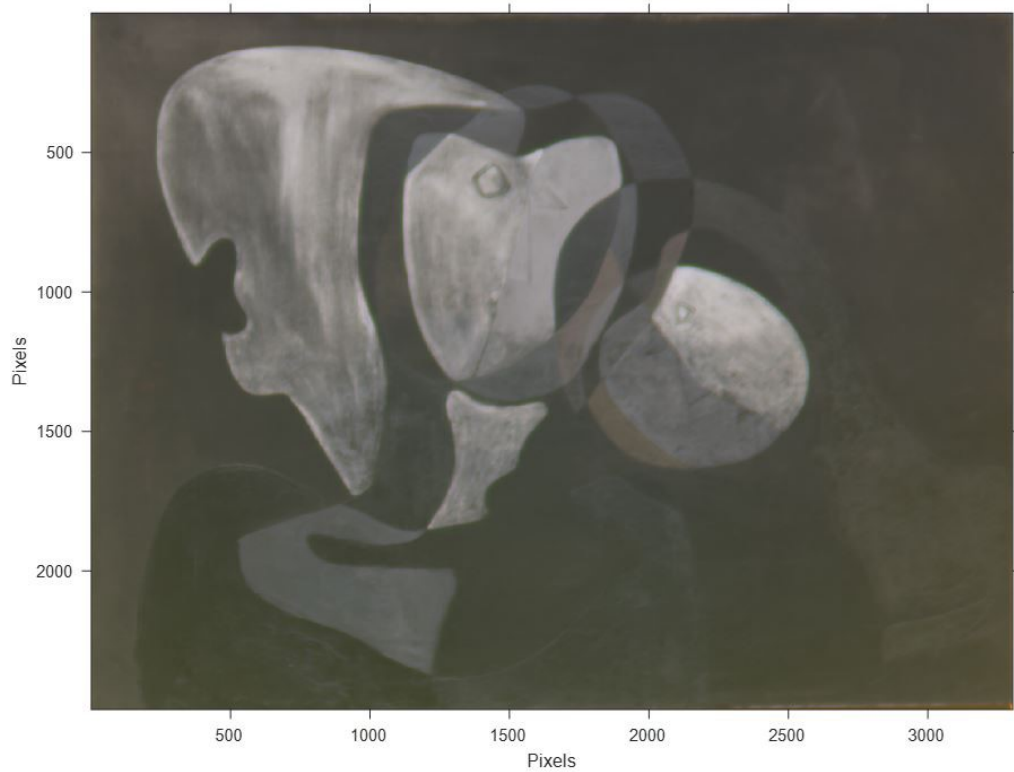


Figura 4.6: Representación visual que muestra la simulación de *Dos figuras* (1926) de Dalí bajo la iluminación de la matriz específicamente diseñada para reducir el daño fotoquímico en su exposición.

4.3. Discusión

Debido a la diversidad de materiales presentes en las obras de arte, los cuales reaccionan de manera distinta ante la radiación óptica, así como a la gran cantidad de variables que influyen en su deterioro, encontrar patrones de deterioro comunes entre los materiales resulta un desafío. Esto dificulta definir una iluminación

específica que reduzca los efectos del daño fotoquímico en la exposición de obras de arte.

Varios estudios han propuesto modelos para reducir el daño fotoquímico a partir del diseño del perfil espectral de la iluminación prescindiendo de las longitudes de onda que absorbe la superficie iluminada [84, 85, 86]. Este resulta un buen procedimiento para llevar a cabo la iluminación de obras de arte de manera más segura para estas sin alterar su apariencia en la exposición. Sin embargo, resulta complejo definir una iluminación que permita la optimización de la distribución del perfil espectral de forma tan precisa dado que los proyectores permiten la optimización de la distribución del perfil espectral sobre cada punto de la obra de arte, pero tienen un ancho de banda específico en cada canal de emisión.

En el estudio descrito en este capítulo, en lugar de eliminar selectivamente las longitudes de onda absorbidas, se ha diseñado el perfil espectral de una iluminación sobre cada punto de la pintura de Dalí *Dos figuras*. Para ello, se ha partido de la distribución del perfil espectral de un proyector comercial con resolución espacial 4K que permitiera definir adecuadamente el perfil espectral en cada punto de la obra de arte. La valoración del daño en la iluminación desarrollada se hizo a partir del modelo de Berlín comparando el daño producido por el perfil espectral desarrollado con el perfil espectral del iluminante D65, los resultados obtenidos determinaron que la iluminación optimizada genera menor daño fotoquímico sobre la obra de arte. Además, en el desarrollo de la iluminación optimizada también se tuvo en cuenta que las diferencias de color en cada punto con respecto a la iluminación del iluminante D65, y dado que dicho valor fue menor que 1 en cada punto de la obra de arte, la apariencia de la obra de arte en su exposición no se vería alterada.

Se desarrolló una simulación gráfica para visualizar como se vería si la obra de arte fuera iluminada con la iluminación desarrollada. Tanto el desarrollo del perfil espectral optimizado como la simulación se basaron en las medidas de reflectancia espectral descritas en el capítulo 3. Puesto que la apariencia de la obra de Dalí se mantiene, a partir de esta simulación se validaron tanto las medidas de reflectancia espectral de la pintura de Dalí, como el perfil espectral de la iluminación desarrollada en este capítulo.

Capítulo 5

Restauración fotónica virtual de la pintura *Dos Figuras (1926)* de Dalí

El paso del tiempo ejerce un impacto perjudicial sobre las obras de arte, causando su deterioro. Algunas de ellas se encuentran en un estado de fragilidad tal que resulta imposible intervenirlas para su restauración. Este es precisamente el caso de la pintura de Dalí *Dos figuras (1926)*, la cual ha experimentado cambios en su apariencia debido a una serie de factores, incluyendo la transferencia de pigmento rojizo provenientes de otras obras de arte. Además, al comparar la obra de arte en su estado actual con la fotografía de 1926 en la que aparece el artista posando junto a la obra de arte, se puede apreciar áreas oscurecidas por la transparencia de los pigmentos blancos utilizados, y también se aprecia que se han perdido las líneas que estaban presentes en la obra (Figura 5.1). Asimismo, se pueden apreciar grietas y pérdida de pigmentos en distintas secciones de la pintura, demostrando el deterioro causado por el paso del tiempo en su superficie (Figura 5.2).

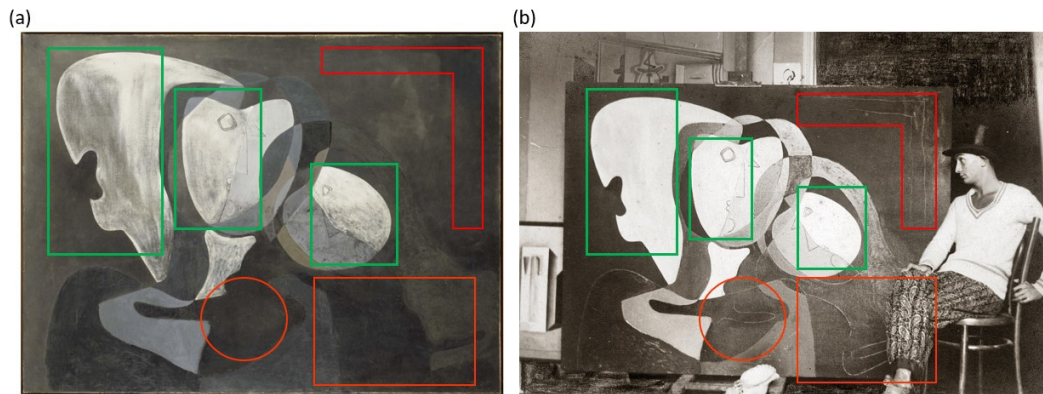


Figura 5.1: Comparativa entre una imagen del estado actual de la obra de arte *Dos Figuras* de Dalí (a) y una imagen cuando fue realizada en 1926 (b). Encuadradas en verde se muestran algunas de las áreas que han oscurecido y se destacan en rojo las secciones que originalmente contenían líneas no visibles en el estado actual de la obra de arte.

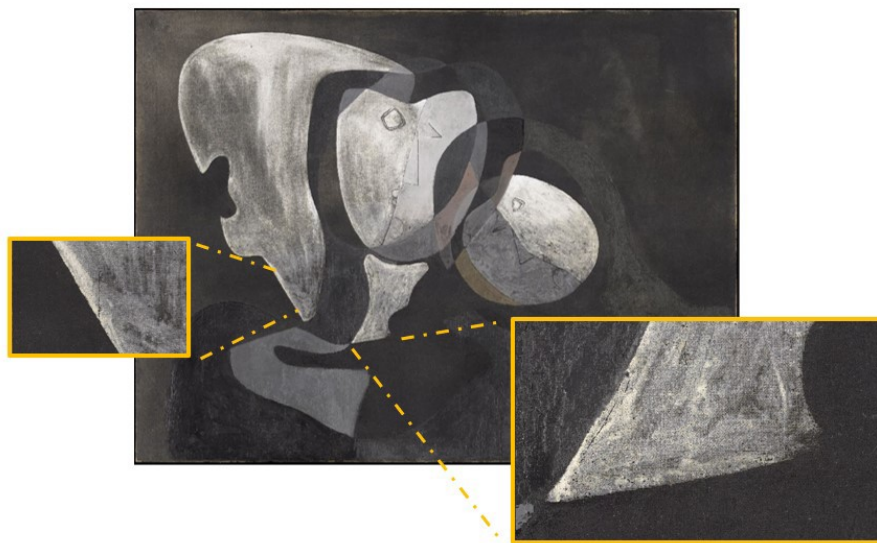


Figura 5.2: Imagen actual de *Dos Figuras* (1926), destacando áreas ampliadas donde se ha desprendido el pigmento y zonas donde han aparecido grietas en la superficie de la obra de arte.

Sin embargo, gracias a los avances en la tecnología de restauración, se ha desarrollado una técnica denominada restauración fotónica virtual. Esta técnica permite alterar, de forma virtual, la apariencia de las obras de arte sin necesidad de intervenir físicamente en ellas. Como se ha explicado en la introducción de esta tesis doctoral, el color de un objeto está influenciado, entre otros aspectos, por el perfil espectral de la iluminación que recibe. Por ende, mediante la proyección controlada de una matriz de iluminación óptimamente ajustada en términos espectrales, se logra modificar la apariencia de cada punto de la obra de arte, según lo requiera el restaurador o conservador. En el caso específico de la obra de Dalí, se empleará la técnica de restauración fotónica virtual para abordar los daños generando así una restauración precisa y reversible que preserva la integridad original de la obra [88].

El precursor de esta técnica fue Lafontaine [89], quién mediante la proyección de luz evitó de manera reversible los efectos del amarilleamiento del barniz sobre la obra de arte *Venus* de Lucas Cranach el Viejo. Stenger et al. [90] llevaron a cabo un estudio en el que desarrollaron la restauración fotónica de los murales de Mark Rothko. Para ello, se basaron en una imagen previa de la obra y tuvieron en cuenta los criterios de restauradores y conservadores para desarrollar una imagen de referencia de la obra de arte restaurada digitalmente que utilizaron como referencia. Asimismo, en un estudio realizado por Vázquez et al. [86] se obtuvo una visión restaurada de una fotografía de la obra de arte *Paseo a orillas del mar* de Sorolla. Se implementó la técnica sobre una fotografía de la pintura que previamente había sido envejecida, empleando un algoritmo especialmente diseñado para este propósito. La técnica de restauración fotónica virtual también es utilizada por Wang et al. quienes en su artículo describen los algoritmos necesarios para ajustar el color de forma virtual a partir de medidas de reflectancia espectral [91].

La implementación de la técnica de restauración fotónica virtual requiere el desarrollo de una matriz, a la cual se le denominará máscara de proyección, que se proyectará sobre la obra de arte (Figura 5.3). Esta matriz debe ser optimizada espectralmente en cada píxel para lograr la apariencia deseada en la obra. En este capítulo se detallan los algoritmos diseñados para su desarrollo.

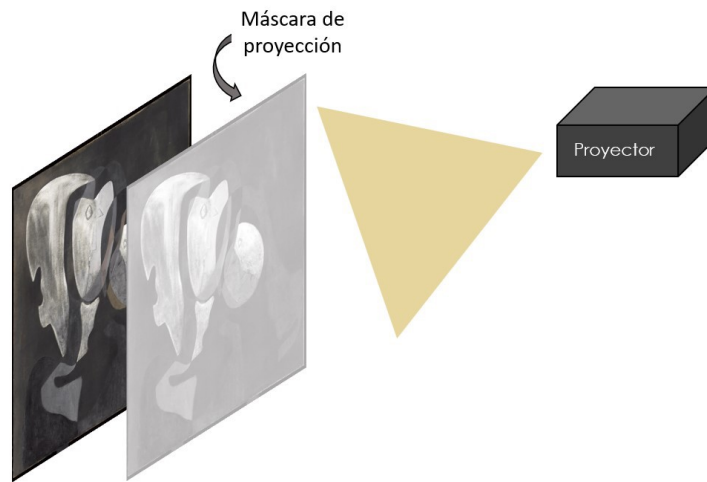


Figura 5.3: Representación esquemática de la proyección de la máscara sobre el cuadro, como parte de la implementación de la técnica de restauración fotónica virtual.

Inicialmente, en esta investigación, se describe el desarrollo de un algoritmo de procesamiento de imágenes basado en la imagen de 1926 para recuperar las líneas desaparecidas mediante la segmentación (Figura 5.4).



Figura 5.4: Imagen de la obra de arte *Dos figuras* de 1926 en su estado original, con detalles ampliados que resaltan las líneas inicialmente presentes en su superficie.

Sin embargo, la mera recuperación de la forma de las líneas no es suficiente. Es crucial definir el perfil espectral que estas líneas deben tener para que, al proyectarse sobre el pigmento negro base actual en la zona donde deberían ubicarse, se visualicen con el color adecuado. La imagen de 1926 no proporciona la información necesaria para definir el color adecuado. Por consiguiente, basándonos en el criterio del equipo de restauración, también en esta sección se describe un algoritmo que, tomando como referencia un pigmento similar al utilizado en las partes blancas del cuadro, logra definir el perfil espectral apropiado que se debe proyectar sobre el pigmento negro de base para obtener la apariencia deseada.

5.1. Diseño de la máscara de proyección.

Para crear la máscara de proyección necesaria para aplicar la técnica de restauración fotónica virtual en la pintura de Dalí *Dos figuras (1926)*, es necesario comenzar con la calibración geométrica. Esta etapa implica la definición de las líneas o estructuras específicas que se pretenden incluir en la máscara de proyección $MP(x,y,rgb)$, las cuales serán recreadas sobre la obra de arte. Posteriormente, además de la definición de estas líneas, resulta crucial realizar la calibración colorimétrica a partir de la cual se establece el perfil espectral requerido en cada píxel de x e y de $MP(x,y,rgb)$ para lograr la apariencia deseada.

5.1.1. Segmentación de la imagen de 1926.

Para implementar sobre la obra de Dalí la técnica de restauración fotónica virtual y así recuperar alguna de las líneas que han desaparecido, se utiliza la fotografía de 1926. Para poder extraer de dicha imagen las zonas faltantes, inicialmente, se ha sometido a un proceso de transformación geométrica y así adaptar sus dimensiones y disposición a una de las imágenes del cubo de reflectancia espectral. La elección de la imagen de reflectancia espectral para esta acción es independiente de su longitud de onda, ya que todas las imágenes en el cubo de reflectancia espectral coinciden espacialmente. Este proceso de transformación se ha realizado utilizando las herramientas de procesamiento de imágenes del software MatLab, permitiendo ajustar la imagen histórica de manera precisa a la forma y composición de la obra de arte original. Inicialmente, se ha utilizado el comando *cpselect*

para la selección de puntos comunes entre ambas imágenes. Y después, se utilizan los comandos *fitgeotrans* e *imwarp*. Este procedimiento asegura que $MP(x,y,rgb)$ reproduzca con precisión las áreas específicas que se desean restaurar en la obra de Dalí, ubicándolas de manera exacta en su posición original (Figura 5.5).

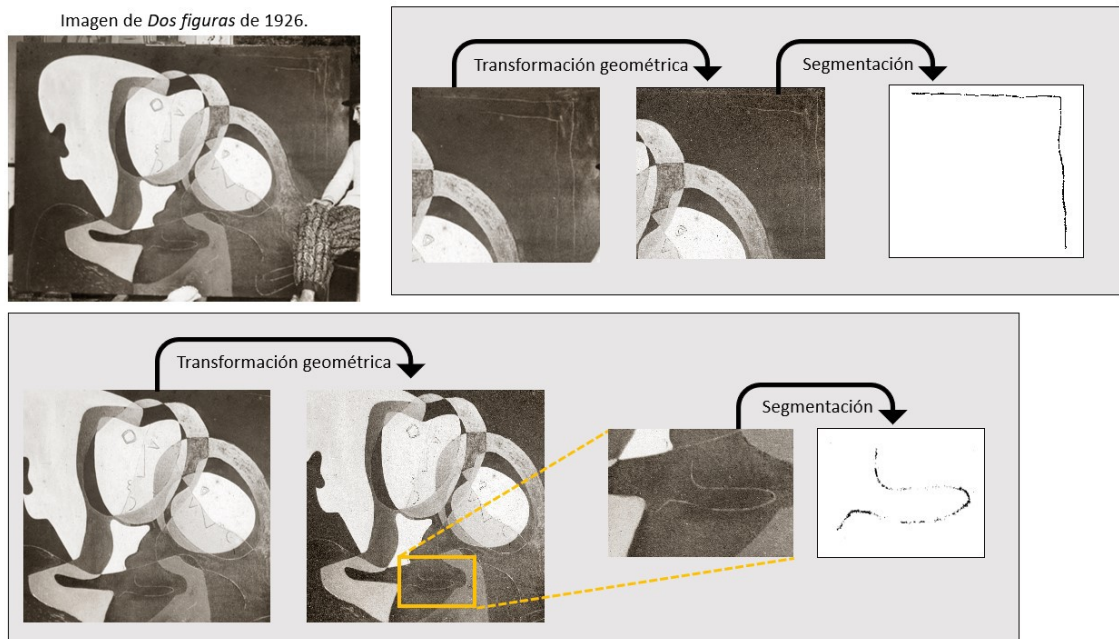


Figura 5.5: Esquema que muestra el procedimiento de transformación geométrica empleado para la segmentación de las líneas presentes en la imagen de *Dos figuras* de 1926.

Una vez que la fotografía de 1926 ha sido transformada y alineada con la imagen de reflectancia espectral, se procede a realizar una segmentación de las líneas basada en los niveles de gris presentes en la imagen. Esta segmentación permite obtener imágenes que representan fielmente la forma y estructura de las zonas que serán proyectadas sobre la obra.

5.1.2. Calibración colorimétrica.

El objetivo de este estudio es recrear dos líneas que originalmente eran parte de *Dos Figuras (1926)* pero actualmente no son visibles. En el apartado previo se explicó cómo se obtiene la forma de estas líneas a partir de la imagen de 1926; sin

embargo, también es necesario determinar el perfil espectral que debe tener cada píxel de $MP(x,y,rgb)$ para que, al proyectarse sobre la obra de arte, las líneas tengan la apariencia deseada. Dado que se carece de información colorimétrica precisa sobre el pigmento utilizado en estas líneas, la única referencia es la imagen de 1926 (Figura 5.4), donde se observan las líneas en color blanco. Por lo tanto, se ha seleccionado una región específica del cuadro, identificada por su pigmento blanco y denominada *zona Obj*, la cual se utilizará como la reflectancia espectral objetivo $\rho(\lambda)_{Obj}$ y servirá para ser utilizada como punto de referencia en la recreación de las líneas faltantes (Figura 5.6).

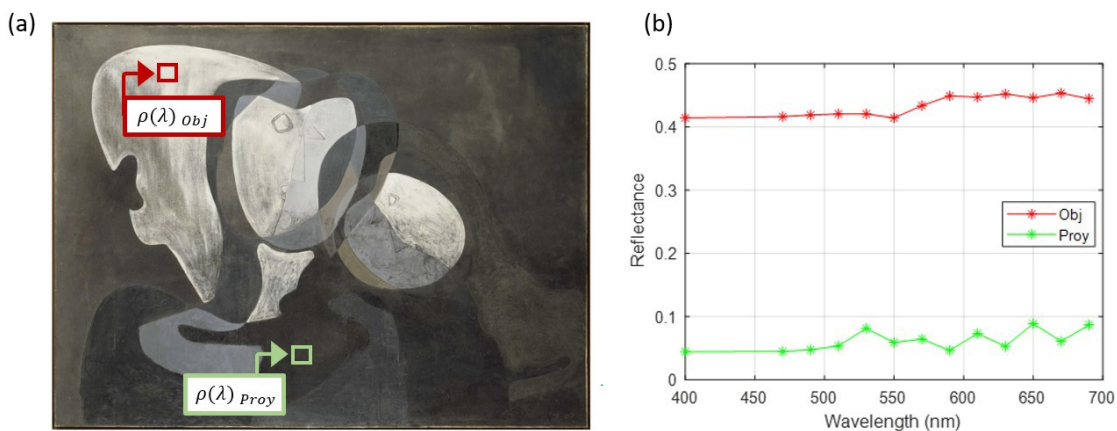


Figura 5.6: Imagen de la obra de Dalí *Dos Figuras* (1926), donde se destacan la *zona Obj*, utilizada como referencia para determinar el color del pigmento blanco, y la *zona Proy*, sobre la cual se proyectarán las líneas (a). Representación de la reflectancia espectral de ambas zonas, obtenida a partir del cubo de reflectancia espectral (b).

Como se ha descrito en la ecuación 1.14 de la sección 1.3.2 el flujo espectral reflejado por un objeto y el cual nos proporciona la información del color se obtiene a partir del producto entre la reflectancia espectral del propio objeto y el perfil espectral de la iluminación incidente sobre él. Por lo tanto, con el conocimiento de la reflectancia espectral de una superficie específica, en este caso la del pigmento blanco $\rho(\lambda)_{Obj}$ y la información correspondiente a la reflectancia espectral sobre la que se proyectará la iluminación optimizada $\rho(\lambda)_{Proy}$, es viable establecer el perfil espectral de la iluminación que debe incidir sobre la zona oscura del cuadro,

denominada *zona Proy*, para lograr el color deseado.

En el capítulo 3 de esta tesis doctoral, se presentó el cubo de reflectancia espectral de toda la superficie de *Dos Figuras (1926)* con alta resolución espacial. Estos datos permite determinar un perfil espectral optimizado que al proyectar $MP(x,y,rgb)$ sobre la obra de arte la apariencia de las líneas sea lo más parecida posible a la *zona Obj*. El perfil espectral optimizado $SPD(\lambda)_p$ se define a partir del cálculo de las constantes κ_R , κ_G y κ_B presentes en la ecuación 5.1. Estas constantes actúan como multiplicadores para cada uno de los canales RGB del proyector empleado en la investigación. En este estudio, se utilizó el modelo de proyector láser Benq LK-952, cuyo perfil espectral se presenta en la figura 4.3.

$$\rho(\lambda)_{Obj} SPD(\lambda)_W = \rho(\lambda)_{Proy} (\kappa_R SPD(\lambda)_{pR} + \kappa_G SPD(\lambda)_{pG} + \kappa_B SPD(\lambda)_{pB}), \quad (5.1)$$

donde SPD_W representa el perfil espectral del proyector al emitir en blanco, con los tres canales RGB configurados en su valor máximo, y $SPD(\lambda)_{pR}$, $SPD(\lambda)_{pG}$ y $SPD(\lambda)_{pB}$ son los perfiles espectrales correspondientes a cada canal RGB del proyector, cuando emiten de manera independiente. Para obtener el valor de las constantes k se desarrolla una función de optimización β que tiene como objetivo obtener el valor de las constantes κ para obtener $SPD(\lambda)_p$ que minimice la distancia euclidiana entre las coordenadas a^* y b^* del color resultante al iluminar la *zona Obj* del cuadro con el iluminante D65 y el color resultante al iluminar la *zona Proy* del cuadro con la iluminación optimizada.

$$\beta = \sqrt{(a_{obj}^* - a_{proy}^*)^2 + (b_{obj}^* - b_{proy}^*)^2}, \quad (5.2)$$

En la figura 5.7 se describe el algoritmo de optimización desarrollado. Para obtener las coordenadas CIELAB, inicialmente se calculan los valores triestímulo utilizando las ecuaciones 1.11, 1.12 y 1.13, tanto para la situación objetivo, como para la situación cuyo perfil espectral se a de optimizar. Estos valores triestímulo proporcionan información sobre la intensidad de los colores primarios necesarios para representar el color percibido utilizando el observador estándar 2° establecido por la CIE. Posteriormente, se calculan las coordenadas CIELAB.

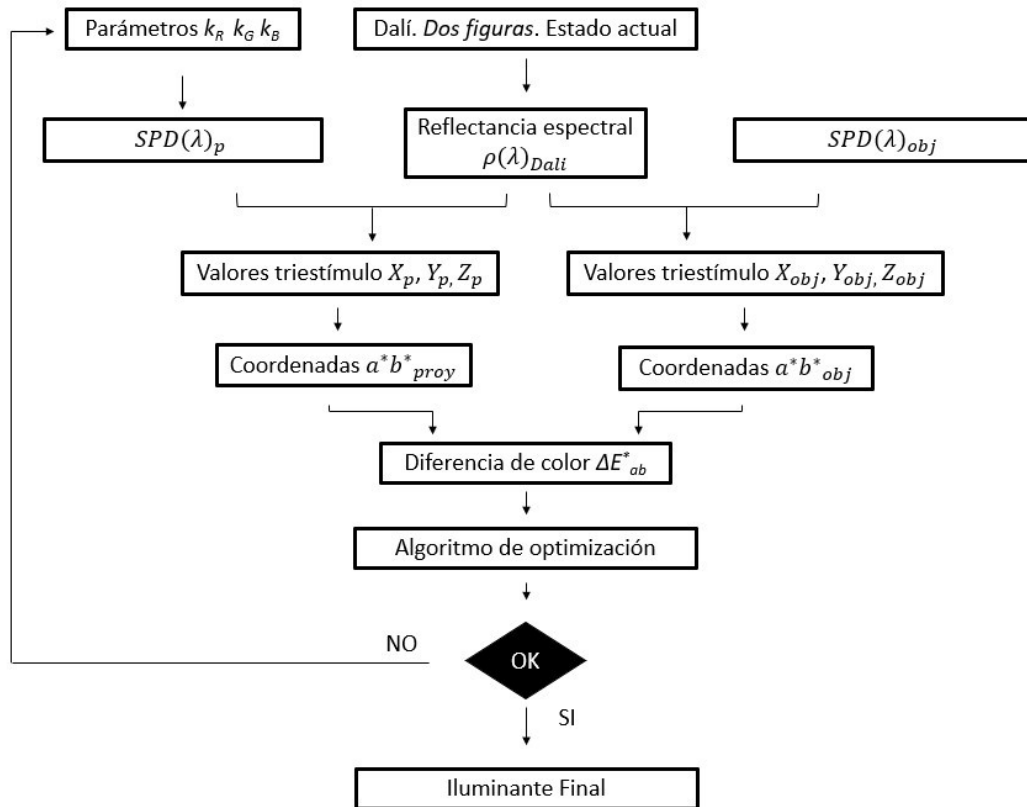


Figura 5.7: Diagrama de flujo que muestra el proceso de optimización utilizado para obtener el perfil espectral en cada punto de la obra de arte que proporcione la sensación visual requerida en cada área específica de la obra de arte

Utilizando la misma fuente de iluminación, que en este estudio es el proyector, alcanzar el mismo nivel de claridad en un fondo negro comparado con un fondo blanco no es factible. Por lo tanto, el algoritmo de optimización desarrollado se enfoca en minimizar el valor de ΔE , considerando únicamente los valores de las coordenadas a^* y b^* del espacio de color CIELAB, excluyendo la componente L^* . El cálculo de L^* se deriva de la fórmula de contraste descrita como:

$$C = \frac{|L_f^* - L_w^*|}{L_f^*}, \quad (5.3)$$

donde L_f^* corresponde a la claridad del fondo oscuro y L_w^* a la claridad de la zona blanca.

Inicialmente, se calcula el contraste entre una zona blanca, con valor $L_w^* = 73.06$, y otra negra del cuadro con valor de $L_f^* = 29.72$. Con el conocimiento del valor de claridad sobre ambas superficies se calcula el contraste con valor $C = 1.46$. Posteriormente, utilizando ese valor de contraste y con el conocimiento del nivel máximo de claridad alcanzable con el proyector sobre el fondo negro, cuyo valor es $L_w^* = 12.31$, se determina el nivel de claridad que debe tener la proyección del fondo para obtener un contraste perceptualmente equivalente, cuyo valor es $L_f^* = 5$. A partir de este valor L_w^* calculado se ajustan proporcionalmente los tres valores de k obtenidos a partir de la función de optimización β con el fin de lograr el valor de claridad necesario para visualizar las líneas.

5.1.3. Calibración espacial de la proyección.

La máscara de proyección $MP(x,y,rgb)$ calculada por el algoritmo es una matriz tridimensional, $MP(x,y,rgb)$, donde x e y corresponden a las coordenadas espaciales y la tercera dimensión representa las intensidades de los canales R , G y B del proyector. En la técnica de restauración fotónica virtual, la alta precisión espacial de la máscara de proyección sobre la obra de arte es fundamental debido a sus variaciones espectrales a nivel de píxel. Pequeñas desviaciones en la posición de la proyección, causadas por factores como vibraciones ambientales, podrían tener un impacto significativo en la apariencia final de la obra de arte.

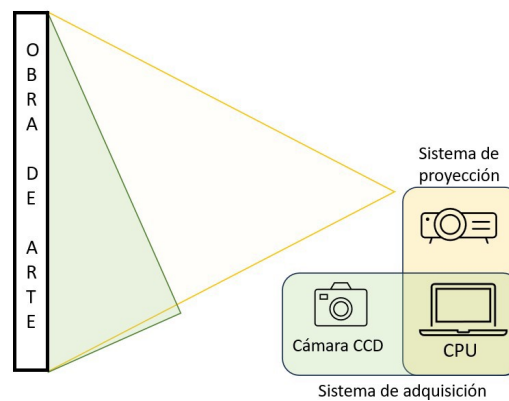


Figura 5.8: Diagrama del sistema de proyección de luz, compuesto por la obra de arte, un sistema de adquisición de imágenes (una cámara CCD y un PC), y un sistema de proyección (un proyector y un PC).

Para garantizar la correcta correspondencia entre las coordenadas espaciales x e y , y las áreas específicas del cuadro, y así evitar distorsiones que pudieran afectar a la proyección sobre la obra de arte, se desarrolla un algoritmo de calibración. En la figura 5.9 se muestra el procedimiento de forma esquemática.

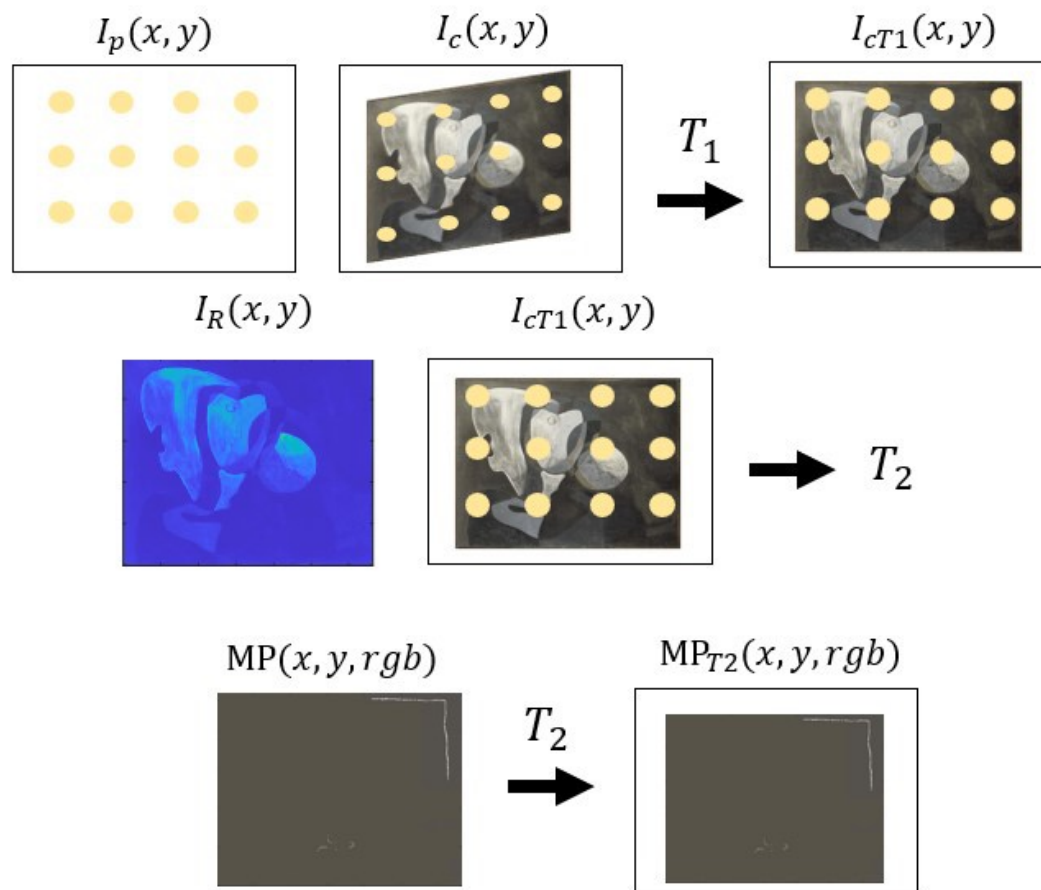


Figura 5.9: Esquema que muestra el procedimiento de transformación geométrica empleado para llevar a cabo la calibración espacial del proyector, garantizando así la precisión en el ajuste de la máscara de proyección sobre la obra de arte.

Este algoritmo se basa en técnicas de triangulación a partir de la transformación geométrica T que se obtiene en dos etapas (T_1 y T_2). La primera transformación geométrica T_1 se desarrolló a partir de la proyección sobre la obra de arte de haces de luz circulares $I_P(x, y)$ que son capturados por una cámara $I_c(x, y)$. Concretamen-

te en esta investigación se utilizó el modelo de cámara CCD DFK-72AUC02-F de Imaging Source con una resolución espacial de 2592×1944 píxeles. Las imágenes capturadas por la cámara son procesadas a partir de herramientas de procesamiento de imágenes de MatLab estableciendo una correspondencia entre los centroides de los haces circulares proyectados y los capturados por la cámara, permitiendo de este modo, obtener los parámetros necesarios para desarrollar la transformación geométrica T_1 que al aplicarse sobre la imagen de la cámara permite relacionar geoméricamente la cámara con el proyector. Posteriormente, se identifican puntos característicos entre la obtenida por la cámara y ya transformada $I_{cT_1}(x,y)$, y una de las imágenes del cubo de reflectancia espectral, $I_R(x,y)$, que como se mencionó en la sección de segmentación es la utilizada como referencia para definir la distribución geométrica de $MP(x,y,rgb)$. Esto da lugar a la obtención de los parámetros necesarios para obtener la segunda transformación T_2 . Esta transformación se aplica a $MP(x,y,rgb)$, generando la máscara de proyección $MP_{T_2}(x,y,rgb)$ y así asegurar una coincidencia espacial precisa al proyectarla sobre la obra de arte y corregir las distorsiones en la composición tridimensional formada por el proyector, la cámara y la obra de arte.

5.2. Resultados

5.2.1. Simulación

La transformación geométrica de la imagen de 1926 (Figura 5.4) ha permitido extraer la forma de las líneas para incluirla en la máscara de proyección $MP(x,y,rgb)$ y así recrearlas sobre la obra de arte en su estado actual (Figura 5.10).

A partir de la calibración geométrica se ha obtenido valor de las constantes κ_R , κ_G y κ_B , para cada canal rojo, verde y azul del proyector, respectivamente. Dicho valor ha sido de $\kappa_{RGB} = [0.34, 0.33, 0.29]$ para la iluminación del fondo y $\kappa_{RGB} = [0.98, 0.96, 0.95]$ para la iluminación de las líneas. Con estos datos se obtiene el contraste de $c = 1.46$ necesario para que las líneas se perciban correctamente.

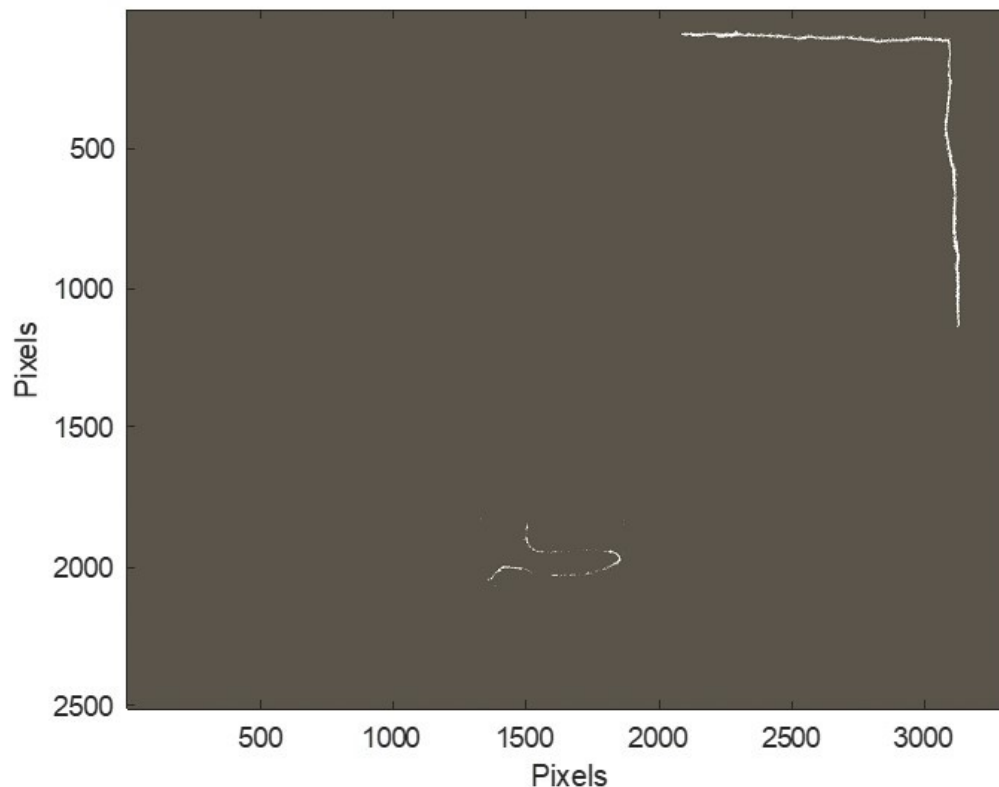


Figura 5.10: Máscara de proyección $MP(x,y,rgb)$ desarrollada que se proyectará sobre la pintura de Dalí *Dos Figuras (1926)* para recrear dos de las líneas faltantes.

Para validar los resultados obtenidos, se lleva a cabo una simulación para comprobar la apariencia que tendría la obra de arte si fuera iluminada por la matriz de proyección $MP(x,y,rgb)$ desarrollada. En esta simulación, se multiplica el perfil espectral optimizado SPD_p , obtenido para cada canal del proyector, por la reflectancia espectral $\rho(x,y,\lambda)$ de *Dos Figuras (1926)*.

A partir de este perfil espectral reflejado, se calculan los valores triestímulo. Estos valores son empleados por el comando `xyz2rgb` de MatLab para obtener los valores rgb , los cuales nos muestran cómo se vería la obra de arte bajo la iluminación proporcionada por la máscara de proyección (Figura 5.11).

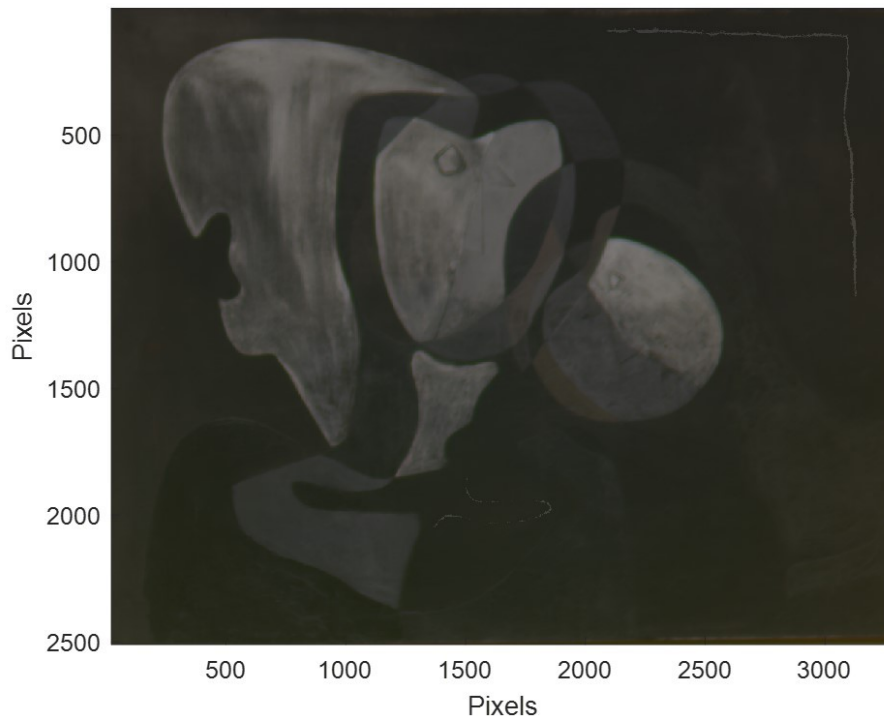


Figura 5.11: Simulación del cuadro de Dalí iluminado por la máscara de proyección $MP(x,y,rgb)$. Esta imagen muestra la recreación de las dos líneas sobre su superficie.

5.2.2. Proyección real sobre *Dos figuras* (1926)

A partir de los algoritmos desarrollados se obtuvieron valores de las constantes κ_{RGB} que permitieron obtener diferentes matrices de proyección que se proyectaron. Sin embargo, la visualización de la proyección se vio comprometida debido a la falta de calibración colorimétrica del proyector. Los valores RGB de $MP(x,y,rgb)$ de entrada que se quiere proyectar sobre la obra de arte no coinciden con los valores RGB de $MP(x,y,rgb)$ proyectada, lo que daba lugar a percepciones inadecuadas del color requerido sobre la proyección.

Para solventar esta limitación, se realizó un ajuste colorimétrico del proyector manualmente. Este ajuste se llevó a cabo midiendo con el espectrofotómetro PR-655 el perfil espectral proyectado sobre la obra de arte. A partir del perfil espectral obtenido por el espectrofotómetro, se realizó el ajuste en los valores de κ_{RGB} para obtener el perfil espectral adecuado sobre la obra de arte.

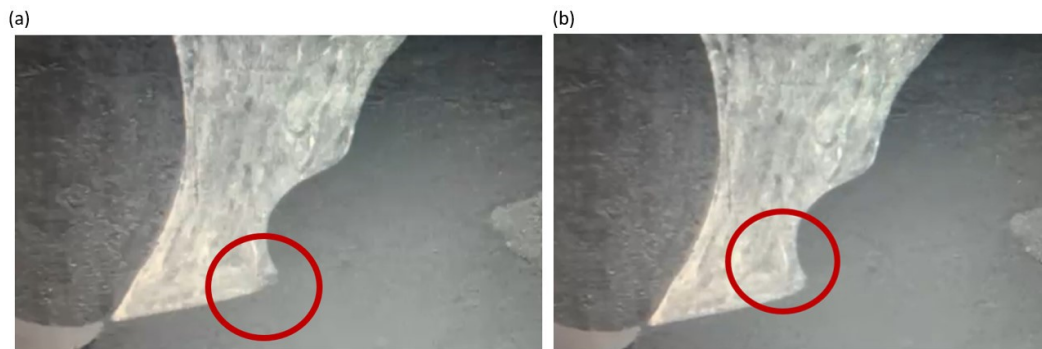


Figura 5.12: Restauración fotónica virtual de la obra de Dalí, *Dos Figuras* (1926). La imagen (a) exhibe un área donde parte del pigmento se ha desprendido de la superficie de la pintura, previo a la iluminación con la máscara de proyección. En la imagen (b), se aprecia la misma zona ahora iluminada con la máscara de proyección.

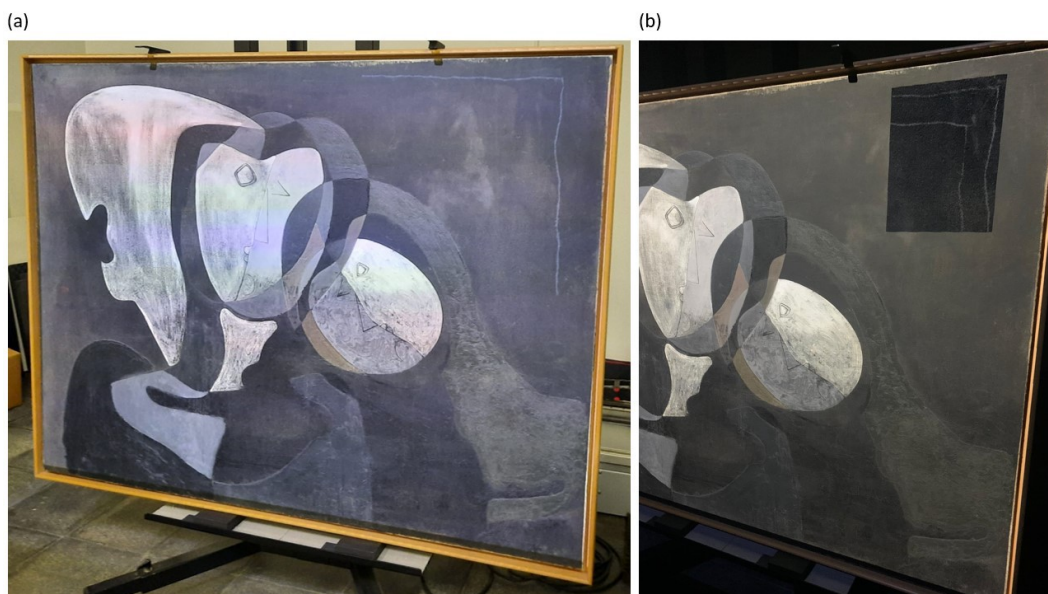


Figura 5.13: Restauración fotónica virtual de la pintura *Dos Figuras* (1926) de Dalí. Se muestra la recreación de una de las líneas faltantes sobre la superficie de la pintura (a) y un rectángulo de su superficie en el cual se ha aplicado la técnica tanto en el fondo como en las líneas (b).

El ajuste colorimétrico manual logró una representación precisa de los resulta-

dos que se muestran en las figura 5.12 y 5.13. Aunque estos resultados confirman la eficacia del método, aún es necesario llevar a cabo la calibración colorimétrica adecuada del proyector para lograr una restauración total y fiel de la obra de arte.

5.3. Discusión

El estado de deterioro de algunas obras de arte dificulta su restauración mediante técnicas habituales, invalidando dicha posibilidad en algunos casos. Por lo tanto, se necesita explorar nuevas técnicas que permitan la visualización de las obras de arte conservando su integridad. La técnica de restauración fotónica virtual ofrece la posibilidad de reconstruir de manera virtual una obra de arte. Como se ha explicado en este capítulo, al desarrollar una máscara de proyección específica, podemos recuperar la apariencia de los pigmentos desprendidos. Esto permite a los espectadores y a los profesionales ver cambios en la obra de arte sin tener que intervenir directamente en ella. Y dado que se consigue a través de la proyección de iluminación resulta reversible y menos dañina en comparación con la iluminación habitual que se utiliza en los museos para la exposición de las obras de arte.

En las investigaciones mencionadas que implementan la técnica de restauración fotónica virtual, se emplean obras de arte ya restauradas como referencia, como en el caso de la técnica descrita por Wang et al. [91]. Por otro lado, Stenger et al. trabajan con una restauración digital de la obra de Mark Rothko, y en el trabajo propuesto por Vazquez et al. implementan la técnica en una imagen envejecida artificialmente, contando así con una imagen objetivo de referencia. Lo novedoso de los algoritmos descritos en este capítulo es su capacidad para implementar la técnica de restauración fotónica virtual utilizando desde un punto de vista colorimétrico, exclusivamente los pigmentos presentes en la propia obra de arte, prescindiendo de la necesidad de imágenes de referencia para lograr la apariencia requerida.

En este estudio, la máscara de proyección se desarrolla a partir de una imagen binaria generada a partir de una imagen de 1926 con baja resolución, asumiendo trazos que podrían no ser totalmente precisos. Sin embargo, se proporciona la herramienta para que sean los restauradores y conservadores en museos quienes desarrollen esa máscara de proyección, utilizando técnicas de trazo adecuadas y garantizando así una mejor visualización de la obra de arte. Por lo tanto, esta técnica

ofrece una valiosa herramienta que les permite visualizar los cambios deseados en la obra de arte antes de intervenirla, siendo particularmente útil en situaciones en las que no se puede seguir el procedimiento habitual de restauración, como en el caso de la obra *Dos figuras (1926)* de Salvador Dalí.

Capítulo 6

Conclusiones

El patrimonio cultural se enfrenta al paso del tiempo y a multitud de factores que lo amenazan. Algunas obras de arte, como la pintura de Dalí *Dos figuras (1926)*, se encuentran en un estado de deterioro tan avanzado que su restauración mediante métodos convencionales no es posible. En esta investigación, se ha implementado la técnica de restauración fotónica virtual en la pintura de Dalí desarrollando un sistema de iluminación que permite recuperar partes de la obra de arte de manera reversible durante su exposición. Previamente ha sido necesario caracterizar espectralmente su superficie a partir de la reflectancia espectral. Para ello, en este estudio, se ha creado un sistema de captura de MSI utilizando dispositivos económicamente accesibles. Estas medidas también han permitido desarrollar métodos de segmentación de pigmentos.

- Se ha diseñado, desarrollado y validado un sistema de captura de MSI que permite obtener medidas de reflectancia espectral de alto rango dinámico (HDR) con resolución espacial 4K. El desarrollo del sistema se ha llevado a cabo a partir de dispositivos accesibles económica y comercialmente, permitiendo de este modo su implementación en diversos sectores para diferentes aplicaciones.
- Se ha desarrollado un método de calibración que permite determinar el patrón de iluminancia sobre una superficie a partir del desplazamiento controlado de la muestra a medir o de la fuente de iluminación. El desarrollo de este método elimina la necesidad de utilizar incómodas y laboriosas pantallas

de calibración del mismo tamaño que la muestra en las medidas de reflectancia espectral a partir de MSI o HSI, por lo que resulta especialmente útil en medidas de obras de arte de gran tamaño.

- Se ha caracterizado espectralmente la pintura de Dalí *Dos Figuras (1926)* a partir de medidas de reflectancia espectral utilizando el sistema de captura de MSI desarrollado. Este sistema permite capturar MSI HDR, lo que posibilita obtener la reflectancia espectral en toda la extensión de la obra de arte, a pesar del amplio rango dinámico inherente a la propia escena de la pintura. La información de reflectancia espectral se ha obtenido con una resolución espacial de 4K (3322x2510 px), por lo que cada píxel de la imagen contiene datos de reflectancia espectral correspondientes a un área de 0.35 mm^2 de la pintura. Estas mediciones se han realizado en el rango del espectro visible, abarcando longitudes de onda entre 470 y 690 nanómetros. Los datos obtenidos representan información objetiva que permite calcular punto a punto el color de la pintura bajo un iluminante determinado para su estudio en futuras intervenciones y análisis de su estado de conservación.
- Se han desarrollado dos métodos de segmentación para identificar aquellos pigmentos presentes en obras de arte que comparten características colorimétricas con otros pigmentos en la pintura, lo que dificulta su análisis mediante los métodos convencionales. Los métodos desarrollados se han implementado sobre la transferencia de pigmento rojizo que afecta a una parte de la pintura de Dalí. Los resultados obtenidos muestran que, en el mismo área, el método 1 identifica un 32% de pigmento rojizo, mientras que el método 2 detecta un 13.87%. El método 2 obtiene un componente rojo puro y el método 1 obtiene más variaciones de color alrededor del pigmento rojizo. Esto posibilita a los restauradores y conservadores en museos utilizar uno u otro en función de las necesidades de la obra de arte sujeta a análisis.
- Se ha creado un algoritmo que permite obtener la iluminación espectralmente optimizada sobre cada punto de la superficie de la pintura iluminada permitiendo reducir el daño fotoquímico en su exposición sin alterar su apariencia frente a la iluminación del iluminante D65. Este algoritmo ha sido desarrollado a partir de medidas de reflectancia espectral y se ha aplicado sobre la

pintura de Dalí obteniendo una iluminación que permite la exposición de la obra de arte reduciendo el daño en un 84.3% sin alterar su apariencia.

- Se han desarrollado algoritmos que han permitido definir la iluminación con el perfil espectral adecuado para implementar la técnica de restauración fotónica virtual sobre la pintura de Dalí.
- Se ha logrado recuperar una de las líneas y una zona de la superficie de la pintura utilizando una fotografía antigua de la obra en baja resolución espacial y las medidas de reflectancia espectral HDR. Estos resultados demuestran la viabilidad de implementar la técnica en la obra de arte completa en futuras intervenciones.

Publicaciones generadas

- Artículos

- [70] J. C. Martínez-Anton, A. Gómez-Manzanares, A. A. Fernández-Balbuena, and D. Vázquez, “Measuring the absorption coefficient of optical materials with arbitrary shape or distribution within an integrating sphere,” *Optics Express*, vol. 29, no. 17, pp. 26287–26303, 2021.
- [41] A. Gómez-Manzanares, D. Vázquez Moliní, A. Alvarez Fernández-Balbuena, S. Mayorga Pinilla, and J. C. Martínez Antón, “Measuring high dynamic range spectral reflectance of artworks through an image capture matrix hyperspectral camera,” *Sensors*, vol. 22, no. 13, p. 4664, 2022.
- [55] A. Gómez-Manzanares, A. J. Benítez, and J. C. Martínez Antón, “Virtual restoration and visualization changes through light: A review,” *Heritage*, vol. 3, no. 4, pp. 1373–1384, 2020.
- [64] A. J. Benítez, X. Prieto Souto, M. Armenteros, E. M. Stepanian, R. Cantos, M. García-Villaraco, J. Solano, and A. Gómez-Manzanares, “Multi-camera work-flow applied to a cultural heritage building: Alhambra’s torre de la cautiva from the inside,” *Heritage*, vol. 5, no. 1, pp. 21–41, 2021.
- [66] A. A. Fernández-Balbuena, A. Gómez-Manzanares, J. C. Martínez Antón, J. G. Gómez-Tejedor, S. Mayorga-Pinilla, H. Durán Roque, and D. Vázquez Moliní, “High-dynamic-range spectral reflectance for the segmentation of paint pigment: Application to Dalí’s oil painting *Dos Figuras* (1926),” *Sensors*, vol 23, no. 9, p. 4316, 2023. Corresponding author: A. Gómez-Manzanares.

■ Patentes

- [52] A. Álvarez Fernández-Balbuena, R. Bernárdez Vilaboa, D. Vázquez-Moliní, S. Mayorga Pinilla, and Á. Gómez-Manzanares, “Multi or hyperspectral camera to maintain side magnification by adjusting the focus.” 2022. ES2819052 B2 Patent with substantive examination.
- [56] A. Álvarez Fernández-Balbuena, Á. Gómez-Manzanares, D. Vázquez-Moliní, S. Mayorga Pinilla, J.C. Martínez Antón and R. Bernárdez Vilaboa, “Instrument and method to calibrate the uniformity of lighting with application as reflectance with multispectral or hyperspectral images.” 2022. ES2911099 B2. Patent with substantive examination.

■ Capítulos libros

- [30] A. A. Fernandez-Balbuena, D. Vazquez Molini, A. Gómez-Manzanares, J. C. Martínez-Antón, and S. Mayorga Pinilla, Reflectance Measurements on Cultural Heritage, p. 149. IntechOpen London, UK, 2022.

■ Congresos

- [11] A. Gómez-Manzanares, D. Vázquez, J. C. Martínez-Antón, R. Bernárdez, S. Mayorga-Pinilla, A. Benítez, and A. A. Fernández-Balbuena, “Restauración fotónica: Aplicación al cuadro de dalí: Dos figuras (1926),” in *Phday 2020 Facultad de Óptica y Optometría (UCM)*, (Online), 2020.
- [17] A. Gómez-Manzanares, D. Vázquez, J. C. Martínez-Antón, R. Bernárdez, S. Mayorga-Pinilla, and A. A. Fernández-Balbuena, “Métodos de alteración del color para mejorar la apreciación del patrimonio cultural en personas con discromatopsia,” in *5^o Congreso Internacional Online de Jóvenes Optométristas. Siyo 2020*, (Online), 2020.
- [54] A. Gómez-Manzanares, D. Vázquez Molini, J.C. Martínez Antón, R. Bernárdez Vilaboa, S. Mayorga Pinilla, A. J. Benítez y A. Álvarez Fernández-Balbuena, “Reflectancia espectral a través de imagen hiperespectral,” in *Phday 2021 Facultad de Óptica y Optometría (UCM)*, (Madrid), 2021. First prize.

- [53] A. Gómez-Manzanares, “Captación de imágenes multiespectrales en tiempo real,” in *Simposio Segvauto 4.0-CM*, (Online), 2021.
- [78] A. Gómez-Manzanares, D. Vázquez, J. C. Martínez-Antón, A. Benítez, and A. A. Fernández-Balbuena, “Desarrollo de un sistema de captura de imagen hiperespectral con resolución de 4k para análisis de la obra de arte de Dalí: Dos figuras,” in *RNO 2021*, (Online), 2021
- [77] A. Gómez-Manzanares, A. A. Fernández-Balbuena, D. Vázquez, J. C. Martínez-Antón, R. Bernárdez, S. Mayorga-Pinilla, A. Benítez, J. G. Gómez-Tejedor, and H. Durán, “Reflectancia hiperespectral de alto rango dinámico con aplicación a la obra de Dalí: Dos Figuras (1926),” in *Phday 2022 Facultad de Óptica y Optometría (UCM)*, (Madrid), 2022. Organizing committee member.
- [79] A. Gómez-Manzanares, A. A. Fernández-Balbuena, D. Vázquez, J. C. Martínez-Antón, S. Mayorga-Pinilla, W. Davis, D. Durmus, L. Micheli, C. Mazzuca, J. G. Gómez-Tejedor, C. Muro, J. Muñoz, and C. Cabello, “Imágenes matriciales de alto rango dinámico para mediciones de reflectancia espectral en obras de arte,” in *Ciencias y tecnologías aplicadas a la conservación del patrimonio. Ciencia y Arte IX*, (Madrid), 2022. Publication with ISBN 978-84-8181-847-5.
- [88] A. Gómez-Manzanares, D. Vázquez, J. C. Martínez-Antón, A. A. Fernández-Balbuena, H. Durán, and J. G. Gómez-Tejedor, “Restauración fotónica virtual de *Dos figuras (1926)*, de Salvador Dalí, a partir de medidas de reflectancia espectral de alto rango dinámico,” in *24^a Jornada de Conservación de Arte Contemporáneo*, (Madrid), Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía, 2023.

Índice de figuras

1.1. Imagen del cuadro en 2019. Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía (MNCARS).	15
1.2. Imagen facilitada por la Fundación Gala - Salvador Dalí, donde aparece Salvador Dalí en 1926 posando junto a <i>Dos figuras</i>	17
1.3. Espectro electromagnético	20
1.4. Representación esquemática de las partes del ojo humano.	21
1.5. Responsividades espectrales de los conos L, M y S. [15].	22
1.6. Representación gráfica que muestra cómo el fenómeno de la visión surge de la interacción entre las fuentes de luz, los objetos y el sistema visual humano.	23
1.7. Distribución espectral normalizada del iluminante D50 (a), del iluminante D65 (b) y del iluminante A (c).	24
1.8. Curva de sensibilidad espectral del ojo humano en condiciones de visión fotópica $V(\lambda)$ y escotópica $V'(\lambda)$ [15].	26
1.9. Representación de las funciones de igualación del color del observador colorimétrico estándar 2° CIE 1931 para los valores de colores primarios RGB (a) y XYZ (b) [15].	28
1.10. Diagrama cromático CIE 1931.	29
1.11. Esquema del espacio de color CIELAB. (https://vkteam.medium.com/android-the-evolution-of-the-photo-editor-f646e604c559)	31
2.1. Esquema de cubo de imagen espectral.	41

2.2. Vista frontal de HYCAM donde se pueden ver los filtros espectrales utilizados acoplados a las cámaras Raspbery pi HQ (a). La vista trasera muestra la configuración de las tres Raspberry Pi 4 utilizadas para controlar las 12 cámaras (b).	46
2.3. Sensibilidad espectral de los sensores Sony IMX477. https://www.arducam.com/sony/imx477).	47
2.4. Transmitancia de los filtros pasa banda ordenados de izquierda a derecha de 470, 490, 510, 530, 550, 570, 590, 610, 630, 650, 670 y 690 nm.	48
2.5. Sistema experimental en el laboratorio donde aparece la muestra utilizada que consta de una tarjeta Colorchecker (modelo clásico) y siete patrones de reflectancia Spectralon de Labsphere (a). La iluminación se realizó con una fuente de 1000 lux de magnitud sobre la muestra (b).	49
2.6. Esquema de la configuración experimental de medición utilizado para obtener la reflectancia espectral mediante MSI HDR. La fuente de luz se coloca a 45° con respecto al dispositivo de medición, <i>HYCAM</i> (a). Las muestras a medir, que incluyen el Colorchecker, las muestras patrón y el objetivo de calibración (b), se colocan en la zona de medición.	49
2.7. Distribución espectral del panel LED utilizado como sistema de iluminación para la medida de reflectancia espectral.	50
2.8. Reflectancia espectral del material PVC espumado utilizado como material de calibración en las medidas de reflectancia espectral.	51
2.9. Esquema de la transformación geométrica de imágenes multiespectrales (MSI) obtenidas con HYCAM.	52
2.10. Curva de respuesta del sensor IMX477.	53
2.11. Esquema de procesamiento de imágenes LDR para obtener imágenes HDR.	54
2.12. Imagen multiespectral (MSI) LDR (a) y HDR (b) a 490 nm de la tarjeta Colorchecker y siete patrones de reflectancia Spectralon de Labsphere.	56

2.13. Se muestra una imagen HDR cuyo valor en escala de grises está calibrado al valor de reflectancia de 490 nm. La imagen incluye una tarjeta ColorChecker y siete muestras patrón calibradas en valor espectral por el laboratorio Labsphere.	57
2.14. Reflectancia espectral obtenida mediante imágenes multiespectrales (MSI) HDR y LDR+, junto con la curva de reflectancia espectral provista por el fabricante para las muestras patrón amarilla (a), azul (b) y verde (c) de Labsphere.	58
2.15. Esquema del instrumento para calibrar la uniformidad de la iluminación en una muestra en vista frontal (a) y vista lateral (b).	61
2.16. Pintura al óleo utilizada como muestra para validar el método de calibración de la uniformidad de la iluminación.	62
2.17. Esquema del montaje experimental desarrollado para llevar a cabo la calibración del método de calibración de la uniformidad de la iluminación	63
2.18. Esquema del algoritmo desarrollado para obtener el patrón de iluminación.	64
2.19. Imagen multiespectral (MSI) a 510 nm de la pintura al óleo en la posición inicial A (a) y en la posición desplazada B (b).	66
2.20. Imagen multiespectral (MSI) a 510 nm de la pintura al óleo obtenida mediante el promedio de cada 20 filas, capturada en la posición A (a) y en la posición desplazada B (b).	67
2.21. Patrón de iluminación obtenido a partir del algoritmo descrito utilizando la pintura al óleo como muestra (a) y una superficie de PVC espumado blanco y uniforme (b).	68
3.1. Imagen RGB de alta resolución espacial de la pintura de Dalí <i>Dos figuras (1926)</i> proporcionada por el MNCARS (a). Sección ampliada de un área de la pintura (b). Ampliación de una de las áreas afectadas por el área de la imagen de pigmento rojizo 6.8x4.9 cm (c). 75	75
3.2. Esquema de la disposición geométrica y distancias utilizadas durante las mediciones de reflectancia espectral de <i>Dos figuras</i> de Dalí en el MNCARS.	77

3.3. Imagen multiespectral LDR de <i>Dos figuras (1926)</i> a 490 nm con píxeles saturados (amarillo) y subexpuestos (rosa).	78
3.4. Reflectancia espectral HDR obtenida del cuadro de Dalí <i>Dos figuras (1926)</i> en el rango espectral entre 470 y 690 nm con pasos de 20 nm.	81
3.5. Reflectancia espectral de alto rango dinámico (HDR) en distintos puntos de <i>Dos figuras (1926)</i> de Dalí. En la imagen izquierda se visualiza la pintura de Dalí con puntos marcados, los cuales corresponden a la reflectancia espectral representada en la gráfica de la derecha.	82
3.6. Imagen del área de referencia 1 para el análisis en una imagen RGB de alta resolución espacial (a), en una imagen RGB obtenida a partir de medidas de reflectancia espectral HDR (b) y en una imagen con información de reflectancia espectral 4K HDR a 630 nm (c).	83
3.7. Representación gráfica de los valores a^*b^* de CIELAB del pigmento rojizo y el pigmento negro presente en el área de referencia 1.	84
3.8. Área negra seleccionada para el análisis (a). $a^*b^*_{(black)}$ para el área negra, acotados por la envolvente (b).	85
3.9. Representación gráfica de la región acordada con los valores $a^*b^*_{(negro)}$ y con los valores $a^*_{(n,m)}$ y $b^*_{(n,m)}$ (a). Representación gráfica de la región acotada con los valores $a^*b^*_{(rojizo1)}$ (b).	86
3.10. Imagen RGB área de segmentación (a). Imagen reflectancia área de segmentación a 630 nm (b). Segmentación del pigmento rojizo en el área de segmentación a partir de los valores $a^*b^*_{(rojizo1)}$ (píxeles rojizos representados en falso color rojo) (c).	86
3.11. Imagen del área de referencia 2, con dimensiones de 11.76 x 8.26 mm (horizontal x vertical), mostrando datos de reflectancia espectral HDR a 630 nm.	87
3.12. Representación gráfica de la región acordada con los valores $a^*b^*_{(negro)}$ y con los valores $a^*b^*_{(rojizo2)}$	88
3.13. Segmentación del pigmento rojizo en el área de segmentación a partir de los valores $a^*b^*_{(rojizo2)}$ (píxeles rojizos representados en falso color rojo).	88

3.14. Representación del color del pigmento analizado cuyos valores RGB han sido obtenidos mediante el valor medio de la reflectancia espectral de los píxeles incluidos en la segmentación utilizando el método 1 (a) y el método 2 (b).	89
4.1. Diagrama de flujo en el que se describen los pasos del proceso de optimización del perfil espectral de la iluminación desarrollada para reducir el daño fotoquímico en la exposición de <i>Dos Figuras (1926)</i> .	95
4.2. Reflectancia espectral HDR de la pintura de Dalí <i>Dos figuras (1926)</i> a 490 nm.	96
4.3. Distribución espectral del proyector láser Benq LK-952.	97
4.4. Representación de la convergencia de la función de mérito con un máximo de 75 iteraciones durante el proceso de optimización para un píxel.	100
4.5. Resultados en: Factor de Daño, GRF, sobre cada píxel de la pintura al iluminarla con la iluminación desarrollada en comparación con el iluminante D65 (a). Diferencia de color, ΔE_{ab}^* , al iluminar la pintura con la iluminación desarrollada en comparación con la iluminación del iluminante D65 (b).	101
4.6. Representación visual que muestra la simulación de <i>Dos figuras (1926)</i> de Dalí bajo la iluminación de la matriz específicamente diseñada para reducir el daño fotoquímico en su exposición.	102
5.1. Comparativa entre una imagen del estado actual de la obra de arte <i>Dos Figuras</i> de Dalí (a) y una imagen cuando fue realizada en 1926 (b). Encuadradas en verde se muestran algunas de las áreas que han oscurecido y se destacan en rojo las secciones que originalmente contenían líneas no visibles en el estado actual de la obra de arte.	106
5.2. Imagen actual de <i>Dos Figuras (1926)</i> , destacando áreas ampliadas donde se ha desprendido el pigmento y zonas donde han aparecido grietas en la superficie de la obra de arte.	106
5.3. Representación esquemática de la proyección de la máscara sobre el cuadro, como parte de la implementación de la técnica de restauración fotónica virtual.	108

5.4.	Imagen de la obra de arte <i>Dos figuras</i> de 1926 en su estado original, con detalles ampliados que resaltan las líneas inicialmente presentes en su superficie.	108
5.5.	Esquema que muestra el procedimiento de transformación geométrica empleado para la segmentación de las líneas presentes en la imagen de <i>Dos figuras</i> de 1926.	110
5.6.	Imagen de la obra de Dalí <i>Dos Figuras (1926)</i> , donde se destacan la <i>zona Obj</i> , utilizada como referencia para determinar el color del pigmento blanco, y la <i>zona Proy</i> , sobre la cual se proyectarán las líneas (a). Representación de la reflectancia espectral de ambas zonas, obtenida a partir del cubo de reflectancia espectral (b).	111
5.7.	Diagrama de flujo que muestra el proceso de optimización utilizado para obtener el perfil espectral en cada punto de la obra de arte que proporcione la sensación visual requerida en cada área específica de la obra de arte	113
5.8.	Diagrama del sistema de proyección de luz, compuesto por la obra de arte, un sistema de adquisición de imágenes (una cámara CCD y un PC), y un sistema de proyección (un proyector y un PC).	114
5.9.	Esquema que muestra el procedimiento de transformación geométrica empleado para llevar a cabo la calibración espacial del proyector, garantizando así la precisión en el ajuste de la máscara de proyección sobre la obra de arte.	115
5.10.	Máscara de proyección $MP(x,y,rgb)$ desarrollada que se proyectará sobre la pintura de Dalí <i>Dos Figuras (1926)</i> para recrear dos de las líneas faltantes.	117
5.11.	Simulación del cuadro de Dalí iluminado por la máscara de proyección $MP(x,y,rgb)$. Esta imagen muestra la recreación de las dos líneas sobre su superficie.	118
5.12.	Restauración fotónica virtual de la obra de Dalí, <i>Dos Figuras (1926)</i> . La imagen (a) exhibe un área donde parte del pigmento se ha desprendido de la superficie de la pintura, previo a la iluminación con la máscara de proyección. En la imagen (b), se aprecia la misma zona ahora iluminada con la máscara de proyección.	119

- 5.13. Restauración fotónica virtual de la pintura *Dos Figuras (1926)* de Dalí. Se muestra la recreación de una de las líneas faltantes sobre la superficie de la pintura (a) y un rectángulo de su superficie en el cual se ha aplicado la técnica tanto en el fondo como en las líneas (b).119

Índice de tablas

1.1. Valores H_{dm} y valores b correspondientes a la función de $S(\lambda)$ para cinco categorías de materiales de museos.	35
2.1. Valores RMS de la reflectancia espectral LDR y HDR, así como los valores de ΔE_{ab}^* , calculados utilizando como referencia el SPD del panel LED y el observador estándar CIE 1931 a 2°. Estos resultados se comparan con las mediciones obtenidas mediante el espectrofotómetro PR-655 y las curvas de reflectancia calibradas proporcionadas por el fabricante.	59
3.1. Análisis de los resultados obtenidos con los dos métodos de segmentación colorimétrica de pigmentos descritos.	89

Bibliografía

- [1] Conferencia General de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, “Convención sobre la protección del patrimonio mundial, cultural y natural,” Nov. 1972. Available: <https://whc.unesco.org/archive/convention-es.pdf>. Accessed on 2024-03-04.
- [2] Council of Europe, Committee of Ministers, “Recommendation of the Committee of Ministers to member States on the European Cultural Heritage Strategy for the 21st century’.” Recommendation, 2017. Available: <https://www.coe.int/en/web/culture-and-heritage/strategy-21>. Accessed on 2024-03-04.
- [3] European Commission and Directorate-General for Research and Innovation, *Horizon Europe strategic plan 2025-2027 analysis*. Publications Office of the European Union, 2023.
- [4] Council of Europe, Committee of Ministers, “Faro Convention Action Plan Handbook 2018-2019,” 2018. Available: <https://www.coe.int/en/web/culture-and-heritage/faro-action-plan>. Accessed on 2024-03-04.
- [5] G. Néret and R. Descharnes., *Dalí. La obra pictórica*. Taschen Benedikt., 2013.
- [6] A. F. Molina., *Dalí. Artistas españoles contemporáneos*. Servicio De Publicaciones Del Ministerio De Educación Y Ciencia., 1974.
- [7] V. Bozal, *Pintura y escultura españolas del siglo XX (1900-1939)*, vol. XXXVI. Espasa Calpe, 1992.

- [8] Dalí, *La vida secreta de Salvador Dalí*. Vision Press, 1948.
- [9] R. Dang, B. Wang, X. Song, F. Zhang, and G. Liu, “The mathematical expression of damage law of museum lighting on dyed artworks,” *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, p. 10951, 2021.
- [10] D. Durmus, “Characterizing color quality, damage to artwork, and light intensity of multi-primary leds for museums,” *Heritage*, vol. 4, no. 1, pp. 188–197, 2021.
- [11] A. Gómez-Manzanares, D. Vázquez, J. C. Martínez-Antón, R. Bernárdez, S. Mayorga-Pinilla, A. Benítez, and A. A. Fernández-Balbuena, “Restauración fotónica: Aplicación al cuadro de Dalí: Dos figuras,” in *Phday 2020 Facultad de Óptica y Optometría (UCM)*, (Online), 2020.
- [12] R. Ditchburn, *Óptica*. Reverte, 1982.
- [13] J. Catalá, *Física general*. Fundación García Muñoz, 1979.
- [14] P. C. Perea, *Percepción visual: Psicofísica, mecanismos y modelos*. Panamericana, 2019.
- [15] M. D. Fairchild, *Color appearance models*. John Wiley & Sons, pp. 9, 6, 69, 72, 73, 64, 65, 75, 2013.
- [16] J. Schanda, *Colorimetry: understanding the CIE system*. John Wiley & Sons, pp. 91, 391, 2007.
- [17] A. Gómez-Manzanares, D. Vázquez, J. C. Martínez-Antón, R. Bernárdez, S. Mayorga-Pinilla, and A. A. Fernández-Balbuena, “Métodos de alteración del color para mejorar la apreciación del patrimonio cultural en personas con discromatopsia,” in *5º Congreso Internacional Online de Jóvenes Optometristas. Siyo 2020*, (Online), 2020.
- [18] E. F. Zalewski, “Radiometry and photometry,” *Handbook of optics*, vol. 2, pp. 24–1, 1995.
- [19] I. Ashdown and P. Eng, “Photometry and radiometry,” *President by Heart Consultants Limited*, 2002.

- [20] R. W. G. Hunt and M. R. Pointer, *Measuring colour*. John Wiley & Sons, pp. 41, 2011.
- [21] H. X. Liu, B. Wu, Y. Liu, M. Huang, and Y. F. Xu, “A discussion on printing color difference tolerance by CIEDE2000 color difference formula,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 262, pp. 96–99, 2013.
- [22] D. Camuffo, *Microclimate for cultural heritage: Measurement, risk assessment, conservation, restoration, and maintenance of indoor and outdoor monuments*. Elsevier, 2019.
- [23] N. Hassanizadeh, E. Noorzai, and A. Mohseni, “Identification of effective criteria to improve lighting quality in existing art museums,” *Journal of Facilities Management*, vol. 18, no. 2, pp. 131–158, 2020.
- [24] E. Lucchi, “Review of preventive conservation in museum buildings,” *Journal of Cultural Heritage*, vol. 29, pp. 180–193, 2018.
- [25] CIE, “Publication 157: 2004. Control of damage to museum objects by optical radiation,” 2004.
- [26] D. R. Peddle, H. P. White, R. J. Soffer, J. R. Miller, and E. F. Ledrew, “Reflectance processing of remote sensing spectroradiometer data,” *Computers & geosciences*, vol. 27, no. 2, pp. 203–213, 2001.
- [27] S. Mayorga, D. Vazquez, C. Cabello, M. Melgosa, C. Muro, and A. A. Fernandez-Balbuena, “Evaluation of the influence of varnish on the color of Picasso’s *Woman in Blue*,” *Spectroscopy Letters*, vol. 53, no. 2, pp. 140–151, 2020.
- [28] J. Striova, A. Dal Fovo, and R. Fontana, “Reflectance imaging spectroscopy in heritage science,” *La Rivista del Nuovo Cimento*, vol. 43, pp. 515–566, 2020.
- [29] CIE 015:2018, *Colorimetry, 4th Edition*. CIE Central Bureau, Vienna, 2018.
- [30] A. A. Fernandez-Balbuena, D. Vázquez Moliní, A. Gómez-Manzanares, J. C. Martínez-Antón, and S. Mayorga Pinilla, *Reflectance Measurements on Cultural Heritage*, p. 149. IntechOpen London, UK, 2022.

- [31] C. Cucci, J. K. Delaney, and M. Picollo, “Reflectance hyperspectral imaging for investigation of works of art: Old master paintings and illuminated manuscripts,” *Accounts of chemical research*, vol. 49, no. 10, pp. 2070–2079, 2016.
- [32] T. Skauli and J. Farrell, “A collection of hyperspectral images for imaging systems research,” in *Digital Photography IX*, vol. 8660, pp. 89–95, SPIE, 2013.
- [33] C. I. Chang, *Hyperspectral data processing: algorithm design and analysis*. John Wiley & Sons, 2013.
- [34] L. Tao and A. Mughees, *Deep Learning for Hyperspectral Image Analysis and Classification*, vol. 5. Springer, 2021.
- [35] M. F. Ali, S. S. Darwish, and A. M. El Sheikha, “Multispectral analysis and investigation of overlapping layer cartonnage fragments from egyptian museum, Cairo,” *Sci. Cult*, vol. 6, pp. 25–36, 2020.
- [36] D. Kaimaris and P. Patias, “Systematic observation of the change of marks of known buried archaeological structures: Case study in the plain of Philippi, Eastern Macedonia, Greece,” *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, vol. 15, no. 2, pp. 129–142, 2015.
- [37] T. W. Sawyer, A. S. Luthman, and S. E. Bohndiek, “Evaluation of illumination system uniformity for wide-field biomedical hyperspectral imaging,” *Journal of Optics*, vol. 19, no. 4, p. 045301, 2017.
- [38] J. Kutrašnik, F. Pernuš, and B. Likar, “A method for characterizing illumination systems for hyperspectral imaging,” *Optics express*, vol. 21, no. 4, pp. 4841–4853, 2013.
- [39] Z. Zou, H.-L. Shen, S. Li, Y. Zhu, and J. H. Xin, “Lighting deviation correction for integrating-sphere multispectral imaging systems,” *Sensors*, vol. 19, no. 16, p. 3501, 2019.
- [40] K. Mahmoud, S. Park, S.-N. Park, and D.-H. Lee, “An imaging spectrophotometer for measuring the two-dimensional distribution of spectral reflectance,” *Metrologia*, vol. 51, no. 6, p. S293, 2014.

- [41] A. Gómez-Manzanares, D. Vázquez Moliní, A. Alvarez Fernandez-Balbuena, S. Mayorga Pinilla, and J. C. Martínez Antón, “Measuring high dynamic range spectral reflectance of artworks through an image capture matrix hyperspectral camera,” *Sensors*, vol. 22, no. 13, p. 4664, 2022.
- [42] F. J. Bolton, A. S. Bernat, K. Bar-Am, D. Levitz, and S. Jacques, “Portable, low-cost multispectral imaging system: design, development, validation, and utilization,” *Journal of biomedical optics*, vol. 23, no. 12, pp. 121612–121612, 2018.
- [43] J. Brauers, N. Schulte, and T. Aach, “Multispectral filter-wheel cameras: Geometric distortion model and compensation algorithms,” *IEEE transactions on image processing*, vol. 17, no. 12, pp. 2368–2380, 2008.
- [44] C. Li and W. Wang, “LCTF Hyperspectral Imaging for Vegetable Quality Evaluation,” in *Hyperspectral Imaging Technology in Food and Agriculture*, pp. 331–357, Springer, 2015.
- [45] S.-H. Baek, I. Kim, D. Gutierrez, and M. H. Kim, “Compact single-shot hyperspectral imaging using a prism,” *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 36, no. 6, pp. 1–12, 2017.
- [46] B. Geelen, N. Tack, and A. Lambrechts, “A compact snapshot multispectral imager with a monolithically integrated per-pixel filter mosaic,” in *Advanced fabrication technologies for micro/nano optics and photonics VII*, vol. 8974, pp. 80–87, SPIE, 2014.
- [47] N. Genser, J. Seiler, and A. Kaup, “Camera array for multi-spectral imaging,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 29, pp. 9234–9249, 2020.
- [48] Y. Zhang and M. He, “Multi-spectral and hyperspectral image fusion using 3-d wavelet transform,” *Journal of electronics (China)*, vol. 24, pp. 218–224, 2007.
- [49] N. Akhtar, F. Shafait, and A. Mian, “Bayesian sparse representation for hyperspectral image super resolution,” in *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 3631–3640, 2015.

- [50] J. Brauers, N. Schulte, A. A. Bell, and T. Aach, “Multispectral high dynamic range imaging,” in *Color Imaging XIII: processing, hardcopy, and applications*, vol. 6807, p. 680704, International Society for Optics and Photonics.
- [51] E. Reinhard, W. Heidrich, P. Debevec, S. Pattanaik, G. Ward, and K. Myszkowski, *High dynamic range imaging: acquisition, display, and image-based lighting*. Morgan Kaufmann, 2010.
- [52] A. Álvarez Fernández-Balbuena, R. Bernárdez Vilaboa, D. Vázquez Moliní, S. Mayorga Pinilla, and A. Gómez-Manzanares, “Multi or hyperspectral camera to maintain side magnification by adjusting the focus,” 2022. ES2819052 B2. Patent with substantive examination.
- [53] A. Gómez-Manzanares, “Captación de imágenes multiespectrales en tiempo real,” in *Simposio Segvauto 4.0-CM*, (Online), 2021.
- [54] A. Gómez-Manzanares, D. Vázquez, J. C. Martínez-Antón, R. Bernárdez, S. Mayorga-Pinilla, A. Benítez, and A. A. Fernández-Balbuena, “Reflectancia espectral a través de imagen hiperespectral,” in *Phday 2021 Facultad de Óptica y Optometría (UCM)*, (Madrid), 2021. First prize.
- [55] A. Gómez-Manzanares, A. J. Benítez, and J. C. Martínez Antón, “Virtual restoration and visualization changes through light: A review,” *Heritage*, vol. 3, no. 4, pp. 1373–1384, 2020.
- [56] A. Álvarez Fernández-Balbuena, A. Gómez-Manzanares, D. Vázquez Moliní, S. Mayorga Pinilla, J. Martínez Antón, and R. Bernárdez Vilaboa, “Instrument and method to calibrate the uniformity of lighting with application as reflectance with multispectral or hyperspectral images.,” 2022. ES2911099 B2. Patent with substantive examination.
- [57] B. Geelen, N. Tack, and A. Lambrechts, “A compact snapshot multispectral imager with a monolithically integrated per-pixel filter mosaic,” in *Advanced fabrication technologies for micro/nano optics and photonics VII*, vol. 8974, pp. 80–87, SPIE, 2014.
- [58] N. Genser, J. Seiler, and A. Kaup, “Camera array for multi-spectral imaging,” *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 29, pp. 9234–9249, 2020.

- [59] M. Á. Martínez, E. M. Valero, J. L. Nieves, R. Blanc, E. Manzano, and J. L. Vilchez, “Multifocus HDR VIS/NIR hyperspectral imaging and its application to works of art,” *Optics Express*, vol. 27, no. 8, pp. 11323–11338, 2019.
- [60] F. Daniel, A. Mounier, J. Pérez-Arantegui, C. Pardos, N. Prieto-Taboada, S. F.-O. de Vallejuelo, and K. Castro, “Hyperspectral imaging applied to the analysis of Goya paintings in the Museum of Zaragoza (Spain),” *Microchemical Journal*, vol. 126, pp. 113–120, 2016.
- [61] N. Magro, A. Bonnici, and S. Cristina, “Hyperspectral image segmentation for paint analysis,” in *2021 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, pp. 1374–1378, IEEE, 2021.
- [62] J. Li and X. Wan, “Superpixel segmentation and pigment identification of colored relics based on visible spectral image,” *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 189, pp. 275–281, 2018.
- [63] C. Cucci, J. K. Delaney, and M. Picollo, “Reflectance hyperspectral imaging for investigation of works of art: old master paintings and illuminated manuscripts,” *Accounts of chemical research*, vol. 49, no. 10, pp. 2070–2079, 2016.
- [64] A. J. Benítez, X. Prieto Souto, M. Armenteros, E. M. Stepanian, R. Cantos, M. García-Villaraco, J. Solano, and Á. Gómez-Manzanares, “Multi-Camera Workflow applied to a cultural heritage Building: Alhambra’s Torre de la Cautiva from the Inside,” *Heritage*, vol. 5, no. 1, pp. 21–41, 2021.
- [65] J. Li, D. Xie, M. Li, S. Liu, and C. Wei, “Pigment identification of ancient wall paintings based on a visible spectral image,” *Journal of Spectroscopy*, vol. 2020, pp. 1–8, 2020.
- [66] A. A. Fernandez-Balbuena, A. Gómez-Manzanares, J. C. Martínez Antón, J. G. Gómez-Tejedor, S. Mayorga-Pinilla, H. Durán Roque, and D. Vázquez Moliní, “High-Dynamic-Range Spectral Reflectance for the Segmentation of Paint Pigment: Application to Dalí’s Oil Painting Dos Figuras (1926),” *Sensors*, vol. 23, no. 9, p. 4316, 2023.
- [67] J. M. de Luna, A. A. Fernandez-Balbuena, D. Vázquez, M. Melgosa, H. Durán, J. García, and C. Muro, “Accurate measurements of spectral reflectance in

- picasso's guernica painting," *Applied Spectroscopy*, vol. 70, no. 1, pp. 147–155, 2016.
- [68] S.-Y. Huang, A. Mukundan, Y.-M. Tsao, Y. Kim, F.-C. Lin, and H.-C. Wang, "Recent advances in counterfeit art, document, photo, hologram, and currency detection using hyperspectral imaging," *Sensors*, vol. 22, no. 19, p. 7308, 2022.
- [69] G. Chiari and D. Scott, "Pigment analysis: potentialities and problems," *Periodico di mineralogia*, vol. 73, no. 3, pp. 227–237, 2004.
- [70] J. C. Martínez-Anton, A. Gómez-Manzanares, A. A. Fernández-Balbuena, and D. Vázquez, "Measuring the absorption coefficient of optical materials with arbitrary shape or distribution within an integrating sphere," *Optics Express*, vol. 29, no. 17, pp. 26287–26303, 2021.
- [71] Y. Zhang, Z. Zhang, S. DiVerdi, Z. Wang, J. Echevarria, and Y. Fu, "Texture hallucination for large-factor painting super-resolution," in *Computer Vision—ECCV 2020: 16th European Conference, Glasgow, UK, August 23–28, 2020, Proceedings, Part VII*, pp. 209–225, Springer, 2020.
- [72] P. M. Cabezas-Bernal, P. Rodríguez-Navarro, and T. Gil-Piqueras, "Documenting paintings with gigapixel photography," *Journal of imaging*, vol. 7, no. 8, p. 156, 2021.
- [73] T. Rosado, A. Falé, M. Gil, J. Mirão, A. Candeias, and A. T. Caldeira, "Understanding the influence of microbial contamination on colour alteration of pigments used in wall paintings—the case of red and yellow ochres and ultramarine blue," *Color Research & Application*, vol. 44, no. 5, pp. 783–789, 2019.
- [74] B. Grabowski, W. Masarczyk, P. Głomb, and A. Mendys, "Automatic pigment identification from hyperspectral data," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 31, pp. 1–12, 2018.
- [75] A. Chen, R. Jesus, and M. Vilarigues, "Identification and visualization of pure and mixed paint pigments in heritage artwork using machine learning algorithms," *SN Computer Science*, vol. 4, no. 2, p. 115, 2022.

- [76] H. Deborah, S. George, and J. Y. Hardeberg, “Spectral-divergence based pigment discrimination and mapping: A case study on The Scream (1893) by Edvard Munch,” *Journal of the American Institute for Conservation*, vol. 58, no. 1-2, pp. 90–107, 2019.
- [77] A. Gómez-Manzanares, A. A. Fernández-Balbuena, D. Vázquez, J. C. Martínez-Antón, R. Bernárdez, S. Mayorga-Pinilla, A. Benítez, J. G. Gómez-Tejedor, and H. Durán, “Reflectancia hiperespectral de alto rango dinámico con aplicación a la obra de Dalí: “Dos figuras”,” in *Phday 2022 Facultad de Óptica y Optometría (UCM)*, (Madrid), 2022. Organizing committee member.
- [78] A. Gómez-Manzanares, D. Vázquez, J. C. Martínez-Antón, A. Benítez, and A. A. Fernández-Balbuena, “Desarrollo de un sistema de captura de imagen hiperespectral con resolución de 4K para análisis de la obra de arte de Dalí: “Dos figuras”,” in *RNO 2021*, (Online), 2021.
- [79] A. Gómez-Manzanares, A. A. Fernández-Balbuena, D. Vázquez, J. C. Martínez-Antón, S. Mayorga-Pinilla, W. Davis, D. Durmus, L. Micheli, C. Mazzuca, J. G. Gómez-Tejedor, C. Muro, J. Muñoz, and C. Cabello, “Imágenes matriciales de alto rango dinámico para mediciones de reflectancia espectral en obras de arte,” in *Ciencias y tecnologías aplicadas a la conservación del patrimonio. Ciencia y Arte IX*, (Madrid), 2022. Publication with ISBN 978-84-8181-847-5.
- [80] R. Dang, R. Liu, and T. Luo, “Lighting quantity indexes for lighting paintings in museums,” *Building and Environment*, vol. 182, p. 107142, 2020.
- [81] S. M. Pinilla, D. Vázquez, A. Á. Fernández-Balbuena, C. Muro, and J. Muñoz, “Spectral damage model for lighted museum paintings: Oil, acrylic and gouache,” *Journal of Cultural Heritage*, vol. 22, pp. 931–939, 2016.
- [82] R. Dang, Y. Yang, Y. Kang, and H. Tan, “Revealing the photochemical damage behavior of acidified xuan paper based on the spectroscopic investigation and principal component analysis,” *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, p. 123244, 2023.

- [83] H. Luo, C. Chou, H. Chen, and M. Luo, “Museum lighting with LEDs: Evaluation of lighting damage to contemporary photographic materials,” *Lighting Research & Technology*, vol. 51, no. 3, pp. 417–431, 2019.
- [84] J. Zhang and J. Fu, “Laser diode-based projection lighting strategy with peak wavelengths optimization for artwork conservation,” *Journal of Cultural Heritage*, vol. 61, pp. 48–56, 2023.
- [85] D. Durmus and W. Davis, “Optimising light source spectrum for object reflectance,” *Optics express*, vol. 23, no. 11, pp. A456–A464, 2015.
- [86] D. Vázquez, A. A. Fernández-Balbuena, H. Canabal, C. Muro, D. Durmus, W. Davis, A. Benítez, and S. Mayorga, “Energy optimization of a light projection system for buildings that virtually restores artworks,” *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, vol. 16, p. e00128, 2020.
- [87] S. M. Pinilla, D. V. Moliní, A. Á. Fernández-Balbuena, G. H. Raboso, J. A. Herráez, M. Azcutia, and Á. G. Botella, “Advanced daylighting evaluation applied to cultural heritage buildings and museums: Application to the cloister of Santa Maria El Paular,” *Renewable Energy*, vol. 85, pp. 1362–1370, 2016.
- [88] A. Gómez-Manzanares, D. Vázquez, J. C. Martínez-Antón, A. A. Fernández-Balbuena, H. Durán, and J. G. Gómez-Tejedor, “Restauración fotónica virtual de “Dos figuras (1926)”, de Salvador Dalí, a partir de medidas de reflectancia espectral de alto rango dinámico,” in *24^a Jornada de Conservación de Arte Contemporáneo*, (Madrid), Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía, 2023.
- [89] R. H. Lafontaine, “Seeing through a yellow varnish: a compensating illumination system,” *Studies in Conservation*, vol. 31, no. 3, pp. 97–102, 1986.
- [90] J. Stenger, N. Khandekar, R. Raskar, S. Cuellar, A. Mohan, and R. Gschwind, “Conservation of a room: A treatment proposal for Mark Rothko’s Harvard Murals,” *Studies in Conservation*, vol. 61, no. 6, pp. 348–361, 2016.
- [91] X. Wang, Z. Wang, Y. Meuret, K. A. Smet, and J. Zhang, “Point-by-point visual enhancement with spatially and spectrally tunable laser illumination,” *Optics Express*, vol. 30, no. 25, pp. 45327–45339, 2022.