

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

FACULTAD DE BELLAS ARTES DE SAN CARLOS

Departamento de Conservación y Restauración de Bienes Culturales

Máster en Conservación y Restauración de Bienes Culturales



**ANÁLISIS COLORIMÉTRICOS
ALTERNATIVOS: MEDICIONES A PARTIR
DE LA ELABORACIÓN INFORMÁTICA DE
IMÁGENES DIGITALES**



**PRESENTADO POR:
Mainardo Gaudenzi Asinelli**

**DIRIGIDO POR:
María Luisa Martínez Bazán**

RESUMEN

Este trabajo pretende encontrar líneas de investigación alternativas para la medición y monitorización colorimétrica aplicados a superficies coloreadas, indiferentemente de su naturaleza matérica y de su ubicación, disfrutando de las potencialidades ofrecidas por los más actuales medios de captura de imágenes digitales y análisis informático.

En la primera parte, teórica, se han revisado algunos parámetros de investigación utilizados en la calibración colorimétrica de cámaras fotográficas digitales y en el procesado de imágenes digitales, proponiendo ajustes y adaptando a nuestras exigencias analíticas los logros más actuales.

La segunda parte consta de dos fases de investigación: una primera, en la que se han evaluado las propuestas teóricas, relativas a la calibración colorimétrica de una cámara fotográfica digital reflex y a la optimización del procesado informático para extrapolar y evaluar los datos numéricos relativos a los colores de una imagen digital; y una segunda fase en la que se ha elaborado una simulación de cambios colorimétricos sobre revoques coloreados, a fin de evaluar en la práctica el empleo de cámaras fotográficas para medición y monitorización colorimétrica en sustitución de las instrumentaciones convencionales.

Los resultados y el interés demostrado por grupos de investigación, del CNR italiano y de la misma UPV, impulsan a continuar en esta dirección.

Palabras clave: análisis colorimétrico, análisis alternativo del color, procesado de imágenes digitales, elaboración informática.

1. INTRODUCCIÓN (OBJETIVOS, ESTADO DE LA CUESTION Y PLAN DE TRABAJO)	5
2. PARTE TEÓRICA. CONSIDERACIONES BÁSICAS SOBRE EL EMPLEO EN COLORIMETRÍA DE LA FOTOGRAFÍA DIGITAL	8
2.1. INTRODUCCIÓN	8
2.2. CALIBRACIÓN COLORIMÉTRICA DE UNA CÁMARA FOTOGRÁFICA DIGITAL	9
2.2.1. PORQUÉ ES NECESARIA LA CALIBRACIÓN	9
2.2.2. CÓMO CALIBRAR UNA CÁMARA FOTOGRÁFICA DIGITAL	9
2.2.3. PATRÓN (TARGET) SOBRE EL QUE CALIBRAR	10
2.2.4. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN CON COLORCHECKER X-RITE	11
2.2.5. CREACIÓN DE UNA TABLA DE CALIBRACIÓN COLORIMÉTRICA	11
2.3. TRABAJAR CON LOS NÚMEROS DIGITALES DE LAS IMÁGENES RAW	12
2.3.1. QUÉ ES EL RAW Y PORQUÉ NECESITAMOS UTILIZARLO	12
2.3.2. DESCODIFICACIÓN Y ELABORACIÓN DE DATOS RAW	12
2.4. LECTURA, ELABORACIÓN, ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LOS DATOS	13
2.4.1. INFLUENCIA DE LOS APARATOS DE CAPTURA EN LA OBTENCIÓN DE DATOS FIABLES	13
2.4.2. NÚMEROS DIGITALES	14
2.4.2.1. Conseguir una imagen analizable colorimétricamente	14
2.4.2.2. Elaborar una imagen para analizarla colorimétricamente	14
2.4.2.3. Análisis	15
2.4.3. QUÉ DATOS UTILIZAR PARA CALIBRAR Y VALERSE COLORIMÉTRICAMENTE DE UNA CÁMARA FOTOGRÁFICA DIGITAL	15
2.4.3.1. Ejemplos	17
3. PARTE EXPERIMENTAL	18
3.1. CALIBRACIÓN COLORIMÉTRICA Y SUS RESULTADOS	18
3.1.1. INSTRUMENTOS Y PUESTA A PUNTO DE UNA CÁMARA FOTOGRÁFICA DIGITAL PARA LA CALIBRACIÓN COLORIMÉTRICA.....	18
3.1.2. MEDICIONES COLORIMÉTRICAS Y ELABORACIÓN DE LOS DATOS	20
3.1.2.1. Valores espectrofotométricos	20
3.1.2.2. Valores telecolorimétricos	20
3.1.3. CAPTURA FOTOGRÁFICA, ELABORACIÓN DE RAW Y TRANSFORMACIÓN EN IMÁGENES .TIFF	21
3.1.4. OBTENCIÓN Y ELABORACIÓN DE LAS TERNAS RGB CON PHOTOSHOP CS4	21
3.1.4.1. Evaluación del promedio y desviación estándar	21
3.1.5. OBTENCIÓN Y ELABORACIÓN DE LAS TERNAS RGB CON MATLAB 22	
3.1.5.1. Identificación de las ROI desde las que extrapolar los datos RGB	22
3.1.5.2. Extrapolación de las ROI	24
3.1.5.3. Ternas RGB obtenidas por el píxel central (p_1) de las ROI	25
3.1.5.3.1. Promedio y desviación estándar.....	25
3.1.5.4. Ternas RGB obtenidas por una serie de píxeles centrales de la ROI	26
3.1.5.4.1. Promedio y desviación estándar	27
3.1.6. CREACIÓN DE LA TABLA DE CALIBRACIÓN COLORIMÉTRICA PARA LA FOTOCÁMARA NIKON D50	27
3.1.6.1. Análisis de la tabla y sus relaciones. Resultados	28

3.1.6.2. Tabla de calibración colorimétrica para la Nikon D50	30
3.2. ANÁLISIS COLORIMÉTRICO DE MUESTRAS COLOREADAS Y RESULTADOS	31
3.2.1. Elección y preparación de las muestras.....	31
3.2.2. Condiciones e instrumentación para la medición	32
3.2.3. Elaboración y análisis de las imágenes	32
3.2.3.1. Elaboración con CamaraRaw y Photoshop CS4	33
3.2.3.2. Elaboración con MATLAB	34
3.2.3.2.1. ROI localizada para cada muestra coloreada	34
3.2.3.3. Análisis de la superficie coloreada	35
3.2.3.4. Definición de las ternas RGB y obtención de valores colorimétricos	37
3.2.3.4.1. RGB obtenidas del promedio de todos los píxeles de la ROI	37
3.2.3.4.2. RGB obtenidas del promedio de todos los píxeles de la región central de la ROI	38
3.2.3.4.3. Datos RGB elegidos y su interpolación para la obtención de los valores colorimétricos XYZ	39
3.2.3.4.4. Obtención de valores colorimétricos en los espacios CIE-Yxy, CIE-Lab y CIE-LCh	39
3.2.4. EVALUACIÓN DE LOS CAMBIOS COLORIMÉTRICOS CON RELACIÓN A LAS METODOLOGÍAS ADOPTADAS	40
3.2.4.1. Grupo A: análisis	41
3.2.4.2. Grupo B: análisis	42
3.2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
4. CONCLUSIONES	44
4.1. OBJETIVOS CONSEGUIDOS	44
4.2. PERSPECTIVA FUTURA	46
BIBLIOGRAFIA	47
ANEXOS	51

ÍNDICE DE LAS IMÁGENES

Figura 1	10
Figura 2	20
Figura 3	21
Tabla 1	24
Tabla 2	27
Tabla 3	31
Figura 4	33
Figura 5	33
Figura 6	34
Tabla 4	37
Tabla 5	38
Tabla 6	39
Tabla 7	40
Tabla 8	42
Tabla 9	43

1. INTRODUCCIÓN (OBJETIVOS, ESTADO DE LA CUESTION Y PLAN DE TRABAJO)

Este trabajo pretende encontrar nuevas líneas de investigación en el ámbito de la elaboración de métodos innovadores de medición y monitorización colorimétrica aplicados a superficies coloreadas, independientemente de su naturaleza matérica y de su ubicación. Para ello nos valdremos de las potencialidades ofrecidas por los más actuales medios de captura de imagenes digitales y análisis informático.

La posibilidad de conseguir valores colorimétricos a partir de imágenes digitales es en la actualidad un objetivo declarado por la comunidad científica. Dichos estudiosos han empezado, en los últimos años, a evaluar la posibilidad de utilizar sistemas de captura fotográfica digital con el fin de efectuar mediciones colorimétricas. En este sentido cabe destacar que este campo de aplicación puede sustentarse también gracias al hecho de que hoy en día la amplia comercialización de tecnología digital permite investigaciones económicamente sostenibles. Además, desde el punto de vista de la instrumentación fotográfica digital, en la actualidad la mayoría de las cámaras comerciales utilizan sistemas de captura tricromática, esto es, hacen uso de los tres canales de color estándar, R(red) G(green) B(blue), según los principios aceptados de la naturaleza tricromática del sistema visual del ser humano. Así cómo en el proceso visual humano los colores imaginables son el resultado de la mezcla de estos tres primarios, en una cámara digital que emplea el sistema RGB ocurre un proceso análogo.

Estudios significativos se están desarrollando, por ejemplo, en Estados Unidos (Rochester Institute of Technologies) y Francia (Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications), en relación a la posibilidad de analizar los colores y las diferecias de color que se pueden producir por causas diferentes, con particular atención a las pinturas sobre tabla, lienzo o mural. Las investigaciones actuales están centradas, tanto en los posibles instrumentos opto-electrónicos a utilizar o/y desarrollar, como en la elaboración de funciones algebraicas para la elaboración y el análisis de las imagenes a nivel informático. En el mismo sentido se están moviendo investigadores europeos. En la Universidad de Alicante, en colaboración con la Universidad Politécnica de Catalunya, se está trabajando en la aplicación de la medición colorimétrica a partir de fotografía digital para el control de calidad de la producción industrial de piedras y mármoles. Nuestro trabajo pretende insertarse en estas líneas de investigación, evaluando además la posibilidad de aplicar esta tipología de medición a los cambios de color que pueden sufrir superficies coloreadas expuestas al exterior, con particular atención a los revocos de la arquitectura histórica y a las superficies escultóricas.

Debido a que se trata de un gran desafío, con esta tesis de Máster no se pretende finalizar la investigación, sino intentar sentar las bases para el desarrollo de metodologías e instrumentaciones innovadoras. Se ha dejado para más adelante, por ejemplo, la evaluación y aplicación de los recientes avances en la determinación de fórmulas matemáticas para la estimación de espectros de reflectancia a partir de los valores numéricos RGB que forman la imagen digital. Tampoco se han acometido los estudios que se están realizando sobre la utilización de imagenes multi-espectrales. También se han aplazado para la fase de investigación doctoral los análisis al exterior, debido a que estos y otros asuntos se hallan sujetos al desarrollo de instrumentaciones y metodología particulares.

A pesar de las muchas dificultades con que te encuentras cuando se intentan desarrollar nuevas líneas de investigación, queremos destacar algunas de las ventajas que puede conllevar la aplicación de esta innovadora técnica de medición colorimétrica.

a) Optimización de adquisición de datos.

Con una sola fotografía se pueden adquirir los datos numéricos relativos a todos los colores que componen una imagen. Es decir, que a partir de una sola imagen, y previa elaboración de los números RGB, podemos extrapolar una cantidad de datos colorimétricos iguales al número de píxeles que la componen, mientras que con una única medición con instrumentación colorimétrica o espectrofotométrica se puede conseguir una simple terna de valores colorimétricos. Dicho de otra manera, se puede realizar una medición colorimétrica de toda una superficie coloreada sin medir punto tras punto.

b) Exacta localización del área o punto de medición.

En una imagen, compuesta por una cantidad precisa de píxeles, es posible elegir con extrema precisión una ROI (Region Of Interest) formada por uno o más píxeles, y de ésta conseguir los números digitales RGB, convertibles a su vez en valores colorimétricos codificados por la CIE. Esto es, si en una imagen identificamos una ROI para ejecutar nuestros cálculos colorimétricos, la referencia ROI de las imágenes siguientes siempre será la misma o bien el/los píxel/es elegido/s por nuestros análisis siempre se encontrarán en el mismo lugar físico de la imagen, independientemente de la cantidad de imagen que nos sirva para extrapolar los valores numéricos RGB. Y al contrario, cuando se mide un área específica con un colorímetro o espectrofotómetro se hará siempre con un elevado margen de error.

c) Extrema facilidad de utilización del sistema de captura (fotocámara) y su versatilidad.

Un ejemplo significativo de esta característica podría ser la aplicación de un puente wi-fi a nuestra cámara fotográfica, lo que nos permitirá enviar las imágenes, a través de una red inalámbrica, directamente a un puesto de elaboración y análisis de datos, situado en un lugar distinto con respecto a la ubicación del bien cultural investigado. Además, la instalación de una red inalámbrica nos permitiría controlar y organizar las operaciones de medición en cualquier momento y desde cualquier sitio, según nuestras necesidades de investigación. En fin, permitirá controlar diferentes bienes culturales ubicados en lugares distintos.

d) Optimización del proceso de comparación entre el dato visual y los datos numéricos/valores colorimétricos.

El operador no trabaja sólo sobre datos numéricos, sino que también puede informarse, a través de la misma comparación de las imágenes, de las eventuales variaciones cromáticas, lo que ayuda a establecer una relación directa con la obra/superficie sobre la que se está investigando. La comparación visual facilita además la comprensión de las eventuales variaciones cromáticas (expresadas numéricamente) por parte de los operadores “no diagnosticos”, mejorando la comunicación entre restaurador y técnico.

e) Razón económica.

Existe una diferencia significativa de coste entre dispositivos espectrofotométricos y las cámaras fotográficas digitales. Además el operador puede dedicar menos tiempo a la medición *in situ* y más a la elaboración y evaluación de los datos colorimétricos.

Hay que tener en cuenta también, que la posibilidad de desarrollar una instrumentación de medición y monitorización a distancia y en el tiempo comporta mayores ventajas con respecto al empleo de normales espectrofotómetros, porque:

- la actual tecnología de ensamblaje de los sistemas de captura de imágenes digitales permite la creación de maquinarias compactas, protegidas y relativamente pequeñas (piensese, por ejemplo, en un sistema de video-vigilancia), por lo tanto, fácilmente colocables; tres propiedades ventajosas también considerando que un sistema de adquisición así generalmente es concebido para medir y monitorizar bienes y estructuras en espacios abiertos (esculturas, fachadas de edificios, etc.)
- en el mercado ya existen sistemas relativamente baratos que permiten la completa automatización a distancia de instrumentaciones para la captura de imágenes digitales: programación y control de las fases de captura de imágenes (temporizador), envío de datos para sistemas inalámbricos y catalogación en servidores dedicados.

La elaboración y manipulación de imágenes digitales para la obtención de valores colorimétricos, ofrece además la ventaja de poder ejecutar pruebas de color sobre áreas relativamente limitadas, convirtiéndose así en un instrumento de ayuda para la optimización del proceso de medición en sí mismo. Por ejemplo, en el caso de una superficie arquitectónica donde se quiere evaluar el empleo de un consolidante, para valorar si puede comportar alteraciones cromáticas, es posible limitar el área de aplicación al área de captura de la imagen.

Como ya se ha subrayado, existen problemáticas todavía abiertas, como la posibilidad de conseguir espectros de reflectancia de una imagen digital., por que en el contexto de la tesis de Máster se ha creído oportuno limitarnos a:

- la evaluación de las posibilidades que efectivamente podría comportar, desde el punto de vista del análisis colorimétrico,
- el empleo de un sistema de captura de imágenes digitales;
- hasta que punto sería posible utilizarlo *in situ* y que oportunidad puede realmente ofrecer la elaboración digital de las imágenes en el campo de la analítica colorimétrica.

El plan de trabajo de la presente Tesis de Máster consta de las siguientes fases de investigación:

1) Calibración de un sistema digital de captura de imágenes, a fin de poder evaluar el empleo de la fotografía digital en comparación con análisis colorimétricos convencionales sobre superficies coloreadas susceptibles de experimentar alteraciones cromáticas.

2) Comparación entre instrumentación colorimétrica y fotográfica. Evaluación de telecolorímetros, espectrofotómetros y de cámaras fotográficas digitales con respecto a las necesidades de análisis colorimétrico en el campo de la restauración y conservación.

3) Procesado de imágenes digitales. Valoración de las actuales potencialidades informáticas en cuanto a análisis, elaboración y gestión de datos digitales procedentes de imágenes fotográficas.

Los resultados de la tesis de Máster serán, por lo tanto, propedéuticos para una segunda fase de investigación, a realizar en el período de Doctorado, en el que se prevé:

1) Realización de instrumentación específica.

Elaboración de un sistema de captura de imágenes digitales que tenga las propiedades optoelectricas aptas para una medición colorimétrica, tanto para la elaboración del espacio RGB, como para la captura de los espectros. La instrumentación tendrá que ser compatible con su empleo externo (resistencia a cambios ambientales...).

2) Sistema de automatización.

Elaboración de un sistema de control inalámbrico para programar mediciones y su monitorización a través del desarrollo de un software específico.

3) Optimización del flujo de datos y sus elaboraciones.

Planteamiento de un sistema de catalogación y elaboración vía servidor que: facilite el acceso de los operadores a los datos adquiridos; evite un colapso informático; y permita a los operadores seguir al mismo tiempo varios campos de muestreo y monitorización.

2. PARTE TEÓRICA. CONSIDERACIONES BÁSICAS SOBRE EL EMPLEO EN COLORIMETRÍA DE LA FOTOGRAFÍA DIGITAL

2.1. INTRODUCCIÓN

Para poder comprender a fondo las potencialidades que el análisis de imágenes digitales ofrece al campo de la colorimetría aplicada a los bienes culturales, es ante todo necesario definir qué es y de qué se compone una imagen digital.

Las imágenes digitales están formadas por elementos de imagen o píxeles (unidades básicas). Cada píxel contiene tres números incluidos entre el 0 y el 255: el primer número concierne al canal del rojo, el segundo al del verde y el tercero al del azul; es decir, que cada píxel está representado por una terna RGB. Su combinación, que puede llegar a determinar millones de colores, determina el color con que vemos el píxel; y cada uno de estos píxeles, al ocupar un determinado espacio dentro de la imagen digital, podrá ser localizable por sus coordenadas geométricas.

Otro aspecto interesante a evidenciar es cómo, a partir de una precisa elaboración informática de una imagen digital RGB, es posible conseguir otras informaciones de los píxeles que la componen. Por ejemplo, transformando una imagen digital RGB en otra en escala de grises, se puede analizar la intensidad propia de cada píxel que nos permite recabar información referente a la extensión, por ejemplo, de una alteración cromática.

En el curso del trabajo de tesis se ha evaluado la posibilidad de explotar estas características en relación a los cambios colorimétricos.

De lo dicho, se deduce que, a nivel informático, una imagen digital es un conjunto de números y, por lo tanto, susceptible de elaboraciones matemáticas. Por lo que concierne a la colorimetría, esto significa que a través el empleo de particulares fórmulas es posible transformar los números RGB en valores colorimétricos, codificados a nivel de los estándares dados por la Commission Internacional de l'Eclairage (CIE), e incluidos en los espacios de color XYZ, Yxy, LAB o LCh.

Para poder ejecutar este tipo de examen resulta imprescindible, antes de la preparación de las pruebas y la simulación de variaciones de color sobre ellos, definir colorimétricamente la cámara fotográfica a utilizar y lograr sacar valores colorimétricos desde números digitales conseguidos a partir de imágenes fotográficas.

La idea es conseguir una tabla de comparación entre valores colorimétricos¹ y valores numéricos² propios de imágenes producidas por aparatos fotográficas digitales. Es por ello que se hace necesario, preparar una adecuada metodología de comparación entre los valores colorimétricos que se pueden conseguir con diferentes instrumentos especializados.

Nos ocuparemos por lo tanto de definir:

1. un método de calibración
2. métodos de optimización de los datos conseguidos
3. el software a utilizar, así como el modo de utilizarlo para elaborar y analizar imágenes y datos, ya sea en fase de calibración colorimétrica de una cámara fotográfica digital, ya sea en fase de análisis colorimétrico en situaciones reales.

Destacamos, de manera muy general, las ventajas e inconvenientes que se pueden encontrar en la actuación de una medición colorimétrica utilizando una cámara fotográfica con respecto a la utilización de instrumentación especializada:

¹ Estos valores son de tipo *device-independent*, es decir valores independientes de la instrumentación con que se han obtenido.

² Estos valores son de tipo *device-dependent*, es decir valores dependientes de la instrumentación.

- Ventajas:

1. Presenta las mismas ventajas del telecolorímetro con respecto a la posibilidad de determinar con precisión el área geométrica sometida a medición, solo que en el caso de la cámara fotográfica estará sometida al análisis de los datos numéricos representantes de una imagen. Es decir, comparando con un espectrofotómetro, permiten conseguir datos relativos a un área con una única toma.

- Inconvenientes:

1. El principal inconveniente reside obviamente en el hecho que no se trata de un aparato capaz de proveer directamente valores colorimétricos.
2. Como ocurre con el telecolorímetro, su acción depender directamente de los factores externos, que requieren de mucha precisión.
3. Antes de capturar las imágenes, es necesario definir una impostación específica del instrumento (balance del blanco, tipo de archivo, apertura focal, tiempo de exposición, enfoque, etc.). Esta operación es imprescindible para la siguiente elaboración de los archivos "gruesos" ("RAW") con los que el aparato ha capturado las señales externas (las escenas/imágenes reales), y para su transformación en un archivo comprimido y leible por softwares específicos (. tiff).

2. 2. CALIBRACIÓN COLORIMÉTRICA DE UNA CÁMARA FOTOGRÁFICA DIGITAL

2.2.1. PORQUÉ ES NECESARIA LA CALIBRACIÓN

Una cámara digital es una instrumentación definida de tipo *input-device*, es decir, un instrumento con un dispositivo optoelectrónico que permite la captura de señales externas (la luz proyectada hacia el aparato de un imagen/escena real) y los codifica engendrando una imagen digital compuesta por una serie de píxeles (*picture elements*). Cada instrumento lee y codifica las señales externas según el tipo de sensor adoptado, esto es, que cada cámara fotográfica digital puede representar a un color específico con una específica terna RGB. Los valores de rojo, verde y azul, por lo tanto, siempre dependen del instrumento. Además, un mismo modelo de cámara fotográfica digital, incluso utilizando el mismo sensor, puede engendrar diferentes ternas RGB con respecto a un color.

Asimilar esta dependencia de los números RGB creados por una cámara digital aclara la necesidad de adoptar un sistema que permita hacer independientes estos datos. Tal sistema, llamado de calibración o caracterización, consiste en hacer corresponder números digitales RGB dependientes con valores colorimétricos cuya independencia está codificada por el sistema internacional CIE.

2.2.2. CÓMO CALIBRAR UNA CÁMARA FOTOGRÁFICA DIGITAL

La calibración o caracterización de una cámara fotográfica digital se consigue comparando valores colorimétricos conocidos por una serie de patrones coloreados con números digitales RGB conseguidos a partir del análisis de una (o una serie) de fotografías disparadas a los mismos patrones coloreados.

Cuando los valores colorimétricos de estos patrones sean desconocidos, o cuando sean conocidos pero se opta por mediciones con instrumentación propia, es necesario que las condiciones de medición con instrumentación colorimétrica y con cámara fotográfica a caracterizar sean las mismas, controlables y reproducibles. En particular las tres condiciones estándares a tener en cuenta son:

- 1) fuente/es de iluminación
- 2) geometría de iluminación
- 3) ángulo de medición / disparo fotográfico

Para las mediciones espectrofotométricas realizadas con instrumentos de contacto estas condiciones son determinadas directamente por la instrumentación misma y las mediciones son teóricamente mucho más precisas. Para las mediciones con instrumentos de tipo telemétrico y fotográfico digital estas condiciones hay que predisponerlas y controlarlas en laboratorios y las mediciones podrían estar sometidas a error.

2.2.3 PATRÓN (TARGET) SOBRE EL QUE CALIBRAR

Los patrones están constituidos por cartulinas impresas con parches coloreados estandarizados cuyos valores colorimétricos son conocidos por el productor. El número de los parches, su coloración y el tipo de superficie en que están impresos depende también de éste. El patrón de colores comúnmente utilizado en la caracterización colorimétrica de una cámara fotográfica es el ColorChecker de X-Rite a 24 parches coloreados dispuestos en cuatro líneas y seis columnas³:

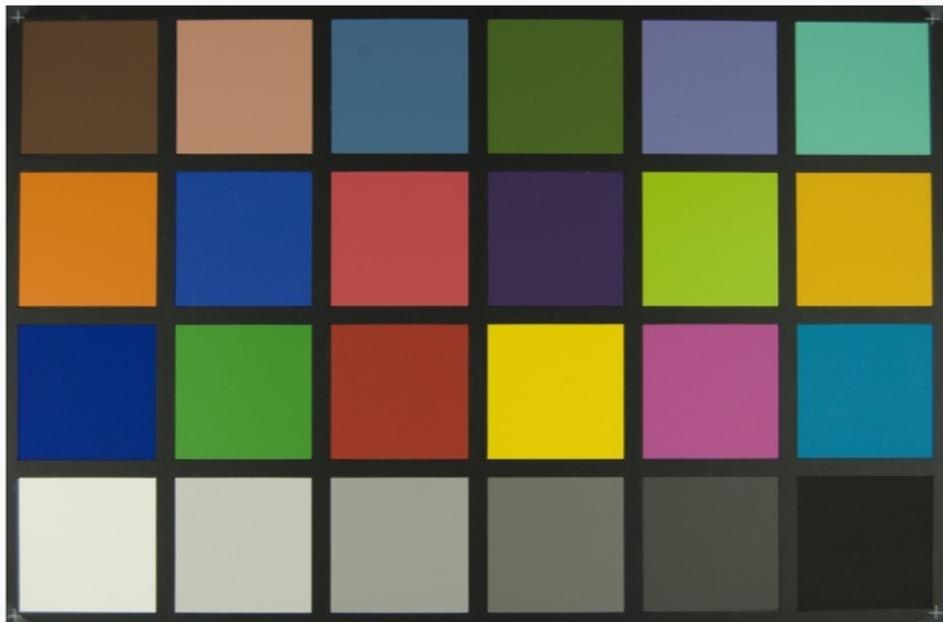


Figura 1. El patrón ColorChecker a 24 parches de la X-Rite

Todos los parches presentan una superficie teóricamente homogénea en cuanto a coloración estructura. Estas características permiten, en teoría y según las indicaciones del productor, tener patrones cuya área coloreada envía siempre el mismo tipo de señal cuando es sometida a mediciones y excluye fenómenos de *scattering* debidos a posible rugosidad de una superficie (uniformidad de la reflexión)⁴.

³ El Technical Committee TC 1-33 del CIE, encargado de actualizar las recomendaciones para el cálculo del índice de rendición del color (Colour Rendering Index) ha recomendado el empleo de este patrón. En bibliografía comparara la documentación del Comité central CIE de Viena.

⁴ Para profundizar: PASCALE, Danny. *RGB coordinates of the Macbeth ColorChecker*, pp. 1-16, 2006, y, del mismo autor, *A review of RGB color spaces... from xyY to R'G'B'*, pp. 5-34, 2003. Estas publicaciones están en

2.2.4 PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN CON COLORCHECKER X-RITE

Son necesarios:

- a) Banco óptico
- b) Fuentes de iluminación estándar (D_{50} o D_{65})
- c) Fotómetro
- d) Luxómetro
- e) Cartulinas de color neutro ("gray cards")
- f) Cámara fotográfica reflex digital
- g) Telécromímetro
- h) Espectrofotómetro

Se montan las parejas de fuentes de iluminación estándar sobre el banco óptico regulando sus brazos para la obtención de un ángulo de iluminación a 45° con respecto al plano horizontal y midiendo, en un entorno oscuro, la intensidad de la iluminación producida con el luxómetro.

Para evitar indeseados fenómenos de reflectancia por parte de la superficie del banco óptico (que podrían superponerse y confundirse con las reflectancias del patrón), los lados del ColorChecker se disponen sobre varias cartulinas estándares de coloración neutra (generalmente un "gray card" utilizado en fotografía).

Se dispone el ColorChecker en el centro del banco óptico de manera que la iluminación resulte homogénea en cada punto del patrón. La homogeneidad se puede averiguar midiendo con el fotómetro el centro del patrón y sus cuatro esquinas correspondientes con los parches coloreados 1, 6, 19 y 24.

En este momento ya es posible montar la cámara fotográfica sobre el eje vertical del banco óptico y disparar la o las fotografías deseadas, tras el adecuado ajuste de la cámara fotográfica. Es necesario precisar que tratándose de imágenes de las que nos interesa analizar la estructura numérica las fotografías tienen que ser disparadas en archivo RAW ("grueso"). Esta opción nos permite evitar compresión y, por lo tanto, pérdida de datos. Además, nos permitirá elaborar un perfil estándar, que en fase de elaboración de los archivos RAW y su siguiente transformación en archivos.tiff, podríamos aplicar a todas las imágenes a utilizar en los análisis colorimétricos. Una vez adoptado el archivo RAW, los ajustes sobre la cámara fotográfica conciernen al enfoque, apertura del diafragma y tiempo de apertura.

Cuando medimos con el telécromímetro debemos tener en cuenta el tipo de brazo del banco óptico en que está dispuesto. Como en nuestro caso el único movimiento posible es en altura y en profundidad, careciendo de movimiento horizontal, nos vimos obligados a desplazar el patrón para permitir el enfoque y la medición de todos los parches coloreados. Será, por lo tanto, indispensable, para cada desplazamiento del ColorChecker, averiguar intensidad y homogeneidad de iluminación. El empleo del espectrofotómetro, obviamente, no depende de ninguna predisposición de parámetros e instrumentaciones externas al mismo.

2.2.5. CREACIÓN DE UNA TABLA DE CALIBRACIÓN COLORIMÉTRICA

Almacenados los valores colorimétricos medidos con espectrofotómetro y telécromímetro y extrapolados los números digitales RGB de las fotografías, por fin se tienen a disposición una serie de 24 ternas numéricas, una de cada parche, con las cuales es posible construir la tabla de caracterización o calibración de la cámara fotográfica utilizada.

<http://www.babelcolor.com>, sitio web al cuidado del mismo autor que representa un lugar de referencia por lo que concierne la utilización del patrón ColorChecker y donde se encuentran análisis periódicamente revisados. Pascal es miembro del SPIE, del OSA y del IEEE.

Utilizando, por un lado las combinaciones numéricas RGB derivadas de una imagen digital y por otro las combinaciones colorimétricas XYZ, derivadas de los análisis efectuados con un telecolorímetro o un espectrofotómetro se consigue una tabla comparativa. Ésta tiene obviamente solamente 24 combinaciones relativas a los 24 colores estándares definidos en este caso por la empresa X-Rite. Utilizando técnicas de interpolación es posible conseguir todas las comparaciones RGB/valores colorimétricos que se deseen.

Obviamente esta tabla de comparación será válida para calibrar colorimétricamente exclusivamente la cámara fotográfica empleada en el proceso de caracterización, y cuando se respeten los parámetros estándares fijados previamente al proceso de calibración.

2.3. TRABAJAR CON LOS NÚMEROS DIGITALES DE LAS IMÁGENES RAW

Una vez definida la metodología adoptada para calibrar una cámara fotográfica digital de tipo reflex, es ahora indispensable comprender cómo se pueden conseguir las ternas numéricas propias de cada píxel a partir de la serie de datos contenidos en un archivo RAW.

2.3.1 QUÉ ES EL RAW Y PORQUÉ NECESITAMOS UTILIZARLO

En general se puede afirmar que los sensores de las cámaras fotográficas digitales están constituidos por una matriz de puntos y capturan una imagen gruesa (llamada "RAW"), monocromática y con informaciones de color codificadas. Cada casa productora de instrumentaciones fotográficas digitales adopta un propio sistema de filtrado que ocurre a nivel del sensor. En nuestro caso, utilizando una cámara fotográfica Nikon, modelo D50, el sensor que captura y filtra las señales externas es de tipo BayerTM, formado por tres matrices monocromas: una destinada al canal R, otra al canal G y la tercera al canal B. En general, el 50% del sensor está destinado a las longitudes de onda del espectro del verde, mientras que rojo y azul se subdividen, por partes iguales, el restante 50%. Simplificando, la imagen fotográfica final (es decir aquella que podremos ver físicamente) viene engendrada por un complejo algoritmo que codifica las señales externas a las que asigna un color. Los archivos con que es posible engendrar la imagen final son aquellos actualmente utilizados en la lectura, elaboración y reproducción de las imágenes digitales⁵.

Los datos adquiridos, antes de la codificación que los transformará en imágenes comunes como .jpeg o .tiff, son almacenados como datos gruesos, por lo tanto, no comprimidos y sobre todo que no han padecido todavía ninguna elaboración algorítmica: los datos adquiridos por la toma fotográfica son definidos técnicamente un RAW. Cada toma, antes de convertirse en una real imagen fotográfica digital, es ante todo una serie de datos RAW.

Todas las cámaras fotográficas digitales capturan en RAW: algunas ponen en marcha en automático la elaboración que transformará los datos gruesos en imágenes reales (generalmente en .jpeg); otras, las reflex, están capacitadas para conservar los datos RAW sin engendrar automáticamente una imagen estándar y mantener, por lo tanto, todos los datos capturados en origen. Las imágenes disparadas en RAW constituyen hasta hoy el máximo nivel cualitativo, porque contienen absolutamente inalterados todos los datos leídos por el sensor de la cámara fotográfica. Los RAW resultan decididamente superiores también al archivo .tiff, porque, no habiendo padecido alguna compresión, todavía contienen la gama dinámica a 12 bits capturada por el sensor.

2.3.2. DESCODIFICACIÓN Y ELABORACIÓN DE DATOS RAW

Como ya se ha comentado, un disparo en RAW no requiere ninguna puesta a punto. Los únicos parámetros a tener en cuenta al sacar una fotografía en RAW son el enfoque, la

⁵ MAIO, Giuseppe. *Reflex. Manuale di fotografia digitale*, pp 231-232

apertura del diafragma, el tiempo de apertura y el ISO utilizado. Los demás parámetros, como el balance del blanco o el espacio color RGB que se utiliza, no influyen en los datos RAW almacenados y son modificables en fase de elaboración de los mismos. Una vez sacadas las fotografías necesitamos descodificarlas y elaborarlas utilizando programas capaces de leer y transformar datos RAW. Estos programas además permiten manipular la distribución tonal, de luminosidad, de brillo, de contraste etc. para crear un perfil adaptable a todas las fotografías⁶.

Debidos a que estamos interesados en analizar datos lo más originarios posible, en la elaboración de un conjunto de datos RAW nos ocuparemos solamente de definir el balance del blanco en función de la iluminación utilizada en el momento de la toma fotográfica. De manera menos determinante nos interesa el brillo y el contraste, para intentar acercar los valores conseguidos a partir de medición colorimétrica a los valores RGB propios de las imágenes.

Además, los mismos programas utilizados para leer y transformar los RAW permiten, una vez aplicado nuestro perfil de conversión a una serie de datos gruesos, también convertir estos últimos en un archivo imagen legible y analizable con otros softwares. Un hecho, este último, que nos permite de exportar y analizar las imágenes en programas específicos. Para nuestros objetivos, el archivo imagen en que convertir el RAW es el .tiff, o bien el archivo que actualmente garantiza más que otros el mantenimiento de los datos originarios sin compresiones y elaboraciones.

2.4. LECTURA, ELABORACIÓN, ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LOS DATOS

Este párrafo toma en consideración todos los tipos de datos que se pueden conseguir en mediciones con espectrofotómetro o telecolorímetro y con cámara fotográfica, evidenciando la posibilidad de optimizar los datos, obtener datos complementarios o derivados, leerlos y elaborarlos.

Lo escrito con relación a los valores derivados del espectrofotómetro y del telecolorímetro queda referido al solo proceso de calibración de la cámara fotográfica adoptada. Los párrafos dedicados a los números digitales intentan introducir y explicar las potencialidades colorimétricas de una cámara de fotografía y la posibilidad que ofrecen algunos instrumentos y aplicaciones softwares en la interpretación de los datos RGB.

2.4.1. INFLUENCIA DE LOS APARATOS DE CAPTURA EN LA OBTENCIÓN DE DATOS FIABLES

Describiendo el proceso de caracterización colorimétrica a través del empleo del ColorChecker hemos subrayado la necesidad de no confiar en los valores colorimétricos y digitales de los 24 parches coloreados definidos por el productor. La motivación principal reside ante todo en el hecho de que estamos hablando de un producto comercial, destinado a una categoría profesional (fotógrafos), que utilizan este y otros patrones de diferentes productores con el objetivo de crear un propio perfil de gestión digital del color y no una caracterización colorimétrica. Por este motivo, por ejemplo, la última producción del ColorChecker de 24 parches adjunta una tabla con valores numéricos sRGB y Lab, pero las mediciones han sido efectuadas con iluminante D₅₀ y observador 2°⁷.

⁶ FRASER, Bruce. *Camera Raw con Photoshop CS2*, pp25-28

⁷ Los valores colorimétricos de los parches del patrón ColorChecker en los diferentes espacios de color CIE y en los diferentes espacios RGB siguen siendo continuamente revisados por los científicos del color y del procesado de imagen. Un sitio de referencia internacional es <http://www.brucelindbloom.com> (Copyright © 2001 – 2009) Bruce Lindbloom, científico del color y actualmente Principal Engineer de la Microsoft Co. Entre otras, se aconseja consultar las secciones del sitio web *ColorChecker RGB Summaries, Spreadsheets and Lab TIFF File* y *How the ColorChecker Calculator Works*. Allí se encuentran también instrumentos on line para calcular las diferencias entre espacios RGB y espacios de color CIE.

Si en fase de calibración no se adoptan los mismos parámetros estamos forzados a aplicar algoritmos de transformación. Además no se pueden excluir imperfecciones del producto. Consecuentemente es necesario medir colorimétricamente el patrón y establecer que instrumento de medición podría ser más idóneo para realizar la caracterización colorimétrica. Una idoneidad que no deberá tener en cuenta exclusivamente la precisión del instrumento en sí, sino también la relación entre el tipo de medición que este instrumento es capaz de efectuar y como se fotografiado.

2.4.2. NÚMEROS DIGITALES

Si los datos obtenidos con espectrofotómetro y telecolorímetro nos sirven solamente para conseguir con precisión una tabla para calibrar colorimétricamente una cámara fotográfica, los números digitales de una imagen representan el verdadero eje de esta investigación.

Desde el punto de vista de la lectura de los datos, mientras que con instrumentaciones colorimétricas las señales capturadas son directamente elaboradas y por lo tanto visualizadas y listas para los análisis, en la fotografía digital siempre hace falta tener en cuenta que las señales son destinadas a una elaboración algorítmica. El resultado es una imagen sobre la que es necesario trabajar para visualizar las ternas de números digitales que representan cada píxel. Este discurso también es válido para los archivos de tipo RAW que, cómo ya se ha comentado, para ser leídos necesitan descodificación y transformación.

Una ulterior diferencia entre aparatos especializados y cámara digital caracterizada colorimétricamente concierne al área de la muestra sometida a medición, que en la fotografía puede ser más amplia y proporcional a la amplitud del enfoque. Esta especificación es esencial. Los dispositivos colorimétricos miden y devuelven los datos relativos a las señales emergentes por un área determinada por su objetivo y limitada a una única medición: en el caso del ColorChecker, por ejemplo, espectrofotómetro y telecolorímetro son capaces de medir solamente un parche por vez, equivalente a un único disparo. Una cámara fotográfica, en cambio, puede capturar toda la superficie del ColorChecker con un disparo, lo que podría equivaler a millones de disparos colorimétricos.

2.4.2.1 Conseguir una imagen analizable colorimétricamente

Fotografiando hace falta tener en cuenta las siguientes condiciones:

- 1) los parámetros propios de una medición telecolorimétrica (fuentes y geometrías de iluminación, geometría de medición);
- 2) el tipo de sensor que utiliza la cámara digital (CCD o CMOS) y, en el caso de CCD, la tipología de filtros del sistema sensorial (BayerTM, FoveonTM, etc.);
- 3) las impostaciones del aparato fotográfico (ISO, apertura del diafragma, etc.);
- 4) el archivo digital en que se dispara;
- 5) el enfoque en función de las áreas coloreadas a analizar.

2.4.2.2 Elaborar una imagen para analizarla colorimétricamente

En la elaboración de las imágenes hace falta tener en cuenta:

- 1) los "ruidos de fondo" propios del dispositivo optoelectrónico;

- 2) los "ruidos de fondo" existentes entre el objetivo de la cámara digital y la superficie fotografiada (ruidos electromagnéticos);
- 3) los fenómenos de distorsión óptica propios de los objetivos;
- 4) evitar cualquier transformación que pueda comportar pérdida de datos por compresión u otro.

2.4.2.3 Análisis

Para analizar los datos numéricos hace falta tener en cuenta:

- 1) si se quiere conseguir números digitales en un *gamut* idóneo para imprimir o para hacer vídeos (objetivo alejado de nuestro interés);
- 2) la elección del programa informático a utilizar para analizar las ternas RGB de las imágenes, teniendo en cuenta las posibilidades de precisión ofrecidas;
- 3) la definición precisa de las áreas a analizar en una imagen. En el proceso de calibración, donde es necesario comparar valores colorimétricos con números digitales, por ejemplo, no se puede obviar las coordenadas espaciales sobre las que se han realizado las mediciones con los aparatos especializados. Estando las imágenes compuestas por píxeles, y conteniendo cada píxel una terna RGB, hace falta elegir si analizar un único píxel central del área medida, una serie de píxel, siempre empezando por el central, o una serie de píxeles elegidos de forma aleatoria.

2.4.3. QUE DATOS UTILIZAR PARA CALIBRAR Y VALERSE COLORIMÉTRICAMENTE DE UNA CÁMARA FOTOGRÁFICA DIGITAL

Teniendo en cuenta lo expuesto y antes de proceder a las mediciones reales, es necesario hacerse algunas preguntas en relación a qué datos colorimétricos efectivamente utilizaremos y qué instrumento informático (software y aplicaciones) puede permitir la lectura y elaboración de los números RGB de manera eficaz para nuestros objetivos.

Ya hemos subrayado que de la precisión con que se elabora una tabla de caracterización depende también la precisión de las mediciones colorimétricas que efectuaremos sobre casos reales. Por lo tanto, es imprescindible valorar a priori qué valores colorimétricos, entre aquellos obtenidos con un espectrofotómetro y aquellos con un telecolorímetro, pueden satisfacer mejor nuestras exigencias de caracterización.

Otras preguntas conciernen a los números digitales RGB: ¿con qué software o aplicación leer los archivos RAW y transformarlos en un archivo imagen no comprimido (.tiff)? ¿una vez creado el archivo imagen adecuado, qué software utilizar para aislar y analizar las áreas de interés (ROI - Region Of Interest) capturadas con un único enfoque sin arriesgar en precisión o, peor, perder datos? ¿Por fin, una vez aisladas las áreas de interés, cuántos y cuáles píxeles elegir para conseguir ternas que correspondan con precisión al valor numérico promedio (o bien al "color") de la ROI?

En relación a la elección del software/aplicación con que leer los RAW, crear un perfil estándar y efectuar la transformación en formato .tiff, se ha elegido CameraRaw⁸. La transformación de un archivo RAW en archivo .tiff efectuada con CameraRaw permite mantener intacta toda la secuencia numérica que forma los datos originarios de una fotografía sacada en digital,

⁸ Es una aplicación gratuita descargable desde AdobeLab, sitio web de aplicaciones freeware de Adobe Co., cuya última versión actualizada se puede utilizar con PhotoShop CS4, siempre de Adobe Co.

prescindiendo del tipo de espacio de color adoptado para representar la imagen .tiff a conseguir⁹.

Además, para elaborar las ROI y procesar y leer los RGB, han sido valorados:

- un programa de tipo estándar, el PhotoShop CS4, porque entre otras cosas es necesario para utilizar CameraRaw,
- MATLAB (de The MathWorks Inc.), que no es un programa sino un lenguaje para la computación, que permite el empleo de una serie de aplicaciones (*tool*) especializadas para la elaboración de cálculos complejos. Por sencillez de lenguaje tenemos definido MATLAB como un "software especializado."

Tenemos que especificar que para los análisis y la comparación de los datos la elección ha recaído tanto sobre los instrumentos MATLAB como sobre Excel, software del paquete Office de MicrosoftTM, porque ambos ofrecen la posibilidad de utilizar instrumentos (funciones) para elaboraciones matemáticas también muy complejas.

Para terminar, la elección de los píxeles a partir de los cuales extrapolar las ternas RGB, como se ha señalado anteriormente, depende sobre todo del porqué se quiere analizar números digitales. En el caso de la calibración ya hemos precisado que tratándose de números a comparar con valores colorimétricos tenemos dos posibles elecciones:

- el píxel que se encuentra al centro absoluto del parche;
- una serie de píxeles elegidos a partir del píxel central de la ROI. En este segundo caso los números RGB a tener en cuenta serán representados por el promedio de los números RGB de cada píxel que hemos considerado.

En el caso en que ya se haya definido una tabla de caracterización colorimétrica y se quiere analizar los números RGB de una o más muestra-color, se podría sumar una tercera opción:

- la elección de píxeles casuales dentro de una ROI definida.

Las tres opciones han sido indicadas como sigue:

p_1 = píxel central;
 p_s = serie de píxeles simétricos elegidos a partir del p_1 ;
 p_n = serie aleatoria de píxeles.

Para contestar a las otras preguntas hemos definido estas posibles relaciones:

A1 = valores colorimétricos obtenidos con espectrofotómetro / números RGB conseguidos con software estándar para la lectura y elaboración de imágenes

A2 = valores colorimétricos obtenidos con telecolorímetro / números RGB conseguidos con software estándar para la lectura y elaboración de imágenes

B1 = valores colorimétricos obtenidos con espectrofotómetro / números RGB conseguidos con software especializado para la lectura y elaboración de las imágenes y de los datos numéricos que las componen

⁹ Es una opción obligatoria que tenemos que insertar en el momento en que el raw se guarda en un cualquier archivo imagen. Pues que no nos ocupamos de gestión digital del color, la elección entre espacio sRGB, AdobeRGB o ProPhoto no perjudica en ningún modo los datos originarios relativos a la imagen de que tendremos que analizar los píxeles y las relativas ternas RGB. En todo caso, siendo obligado a seleccionar una opción, la elección va a ser el espacio ProPhoto o bien lo que actualmente presenta un *gamut* más amplio. Para profundizar sobre los espacios RGB consultar: SÜSSTRUNK, Sabine; BUCKLEY, Robert; SWEN, Steve. *Standard RGB color spaces*, pp. 127-134.

B2 = valores colorimétricos obtenidos con telecolorímetro / números RGB conseguidos con software especializado para la lectura y elaboración de las imágenes y de los datos numéricos que las componen

Para elegir entre espectrofotómetro y telecolorímetro nos basamos en la hipótesis por la cual la relación entre los valores dados por el segundo y los números RGB es la más estrecha, ya que medición colorimétrica y captura de imagen fotográfica son efectuadas respetando los mismos parámetros externos a las instrumentaciones (fuentes de iluminación, geometría de iluminación, geometría de medición).

Para elegir entre PhotoShop CS4 y MATLAB la hipótesis es que utilizando el segundo tendríamos mayores posibilidades de conseguir respuestas precisas y rápidas. Además, hace falta subrayar que PhotoShop CS4, siendo un programa dedicado a la gestión digital del color y a su representación, no presenta una amplia gama de instrumentos para el análisis de los datos numéricos que componen las imágenes; por ejemplo, utiliza algoritmos para efectuar transformaciones de un espacio color a otro, que han sido desarrollados teniendo en cuenta solamente las exigencias de representación de imágenes de la casa productora Adobe Co.

Por otro lado, en entorno MATLAB es posible analizar números y ejecutar complejas elaboraciones tanto a nivel vectorial como matricial, en términos de matemáticas pura. Así, si nos encontramos frente a la necesidad de filtrar una determinada imagen con CS4 la operación de filtración podrá ser reglada someramente por el usuario y, siempre y en todo caso, dentro de parámetros rígidos definidos por el programa mismo. En MATLAB, al revés, una operación de filtración pasa por la elaboración de matrices numéricas sobre las cuales, en cada momento y a cada nivel, el usuario puede intervenir en primera persona.

Estas hipótesis pueden ser confirmadas o desmentidas relacionando entre ellos los valores y números de $A1/A2$ y $B1/B2$, siendo la secuencia de relaciones a analizar la que sigue:

- 1) $A1/A2$ y $B1/B2$: sirven para confirmar o excluir la hipótesis sobre la instrumentación más idónea y elegir si utilizar los valores del espectrofotómetro o del telecolorímetro;
- 2) A_x/B_x , donde x indica el resultado entre $A1$ y $A2$ y entre $B1$ y $B2$: sirve para valorar que tipo de programa sea más idóneo para leer, elaborar y analizar ternas RGB.

Conseguidos los resultados de y entre estas relaciones, hará falta valorar ulteriores relaciones con las tres opción sugeridas por la elección del o de los píxeles de una ROI a analizar.

2.4.3.1 Ejemplos

Poniendo por ejemplo que en el proceso de creación de una tabla de calibración entre $A1$ y $A2$ se valora positivamente $A2$ (es decir, valores del telecolorímetro a comparar con números RGB conseguidos con software estándar); que entre $B1$ y $B2$ se valora positivamente $B2$ (es decir, valores del telecolorímetro a comparar con números RGB conseguidos con software especializado), tendremos que:

- 1) la relación mejor se consigue utilizando los valores del telecolorímetro;
- 2) la valoración siguiente debe ser hecha entre $A2$ y $B2$ para elegir entre software estándar y software especializado;

Si el software especializado ofrece mayores garantías en término de fiabilidad y operatividad, la relación expresa en $B2$ será la que elegiremos como estándar para nuestros análisis colorimétricos. Para terminar, según la exigencia (calibración cámara digital o análisis colorimétrico real) tendremos que valorar con respecto de $B2$ cuál es la mejor entre las tres opciones de definición de píxel:

1) solo para la calibración colorimétrica de una fotocámara digital:

a - $B2/p_1$

b - $B2/p_s$

2) para análisis colorimétricos sobre superficies coloreadas:

a - $B2/p_1$

b - $B2/p_s$

c - $B2/p_n$

3. PARTE EXPERIMENTAL

3.1. CALIBRACIÓN COLORIMÉTRICA Y SUS RESULTADOS

3.1.1. INSTRUMENTOS Y PUESTA A PUNTO DE UNA CÁMARA FOTOGRÁFICA REFLEX DIGITAL PARA LA CALIBRACIÓN COLORIMÉTRICA

Con respecto a los parámetros de calibración enunciados en el capítulo anterior, se ha preparado un banco óptico en ambiente completamente oscuro (laboratorio fotográfico).

La instrumentación utilizada es:

- 1) ColorChecker X-RITE a 24 parches (medidas 22,5x10,5 cm)
- 2) KODAK Gray Cards
- 3) TELECOLORÍMETRO
Productor y Modelo: Minolta CS-100
Área de medición: \varnothing 0,5 cm
- 4) ESPECTROFOTÓMETRO
Productor y Modelo: Minolta CM-2600d
Área de medición: \varnothing 0,5 cm
- 5) CÁMARA FOTOGRÁFICA REFLEX DIGITAL
Productor y Modelo: NIKON D50
Objetivo: AF-S NIKKOR 18-55 mm
- 6) MANDO DE DISTANCIA REMOTA POR CÁMARA FOTOGRÁFICA REFLEX DIGITAL
Productor y Modelo: NIKON InfraRed Remotos Controller ML-L3
- 7) LUXÓMETRO
Productor y Modelo: Minolta T-10
- 8) FOTÓMETRO
Productor y Modelo: Aspen Cooperation - Flash Meter POLARIS.
- 9) FUENTE DE ILUMINACIÓN
Dos lámparas D₆₅
Lux = \pm 1500

El brazo del eje vertical del banco óptico sobre el que deben ser montados el telecolorímetro y la fotocámara ha sido puesto a 56 cm de altura con respecto a la tabla del banco mismo. Las condiciones externas a los dispositivos telecolorimétrico y fotográfico son las siguientes:

- A) Fuente de iluminación: D₆₅
- B) Ángulo de iluminación: 45°
- C) Área de medición de los aparatos de captura perpendicular a la tabla del banco óptico

La cámara fotográfica ha sido programada como se describe a continuación:

- 1) Archivo: RAW (balance del blanco excluido)
- 2) Modalidad de disparo: manual
- 3) Enfoque: manual
- 4) ISO: 200
- 5) Apertura del diafragma: f8
- 6) Tiempo de apertura: 20
- 7) Exposición: oscilante entre -2 y -1, regulada sobre cartulina gris KODAK.

Para conseguir una iluminación homogénea de todos los parches, el ColorChecker ha sido posicionado sobre el plano del banco óptico previa medición con fotómetro de sus 5 áreas más representativas. Los datos relativos a esta medición son:

parche 1, izquierda superior= 10

parche 6, derecha superior= 10

parche 19, izquierda inferior= 10'2

parche 24, derecha inferior= 10'2

centro absoluto del ColorChecker = 10

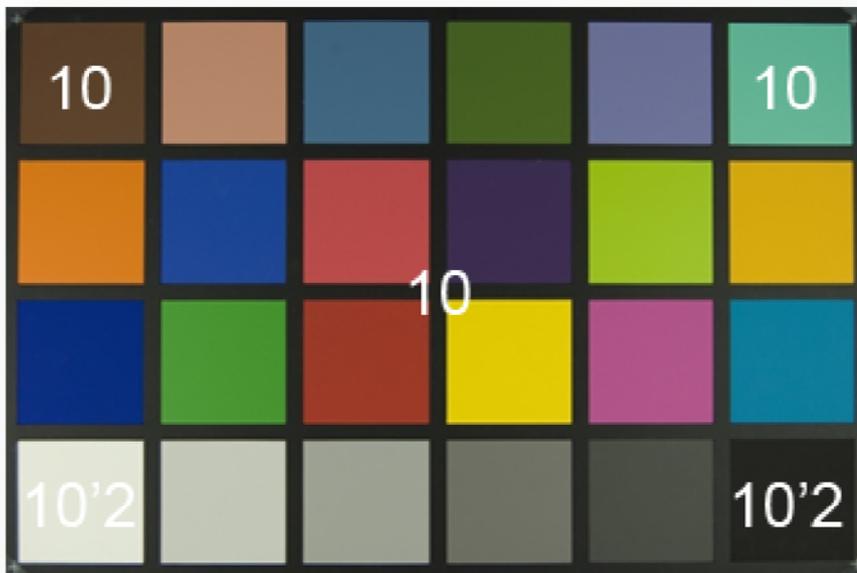


Figura 2. Mediciones con fotómetro para obtener una iluminación homogénea del patrón

Cuando se ha utilizado el telecolorímetro ha sido necesario desplazar el ColorChecker, debido a que el área de medida del aparato es limitada. Para cada desplazamiento se midió nuevamente la homogeneidad de la iluminación, a fin de obtener siempre los mismos rangos de valores de luminancia.

Teniendo en cuenta el diámetro de medición (0,5 mm) las mediciones con telecolorímetro y espectrofotómetro se han efectuado en el área central de cada parche. El punto central equivale al punto de intersección de las diagonales que juntan los cuatro ángulos de cada parche. Obviamente no es posible dibujar directamente las diagonales sobre el patrón, así que, para controlar con exactitud el punto de medición de ambos dispositivos colorimétricos, se ha utilizado un acetato en el que se han dibujados los cuadrados, las diagonales y el punto de intersección relativo a cada parche. Superponiendo el acetato al ColorChecker antes de cada medición es posible averiguar la correspondencia entre puntos centrales del acetato y puntos centrales de los parches.

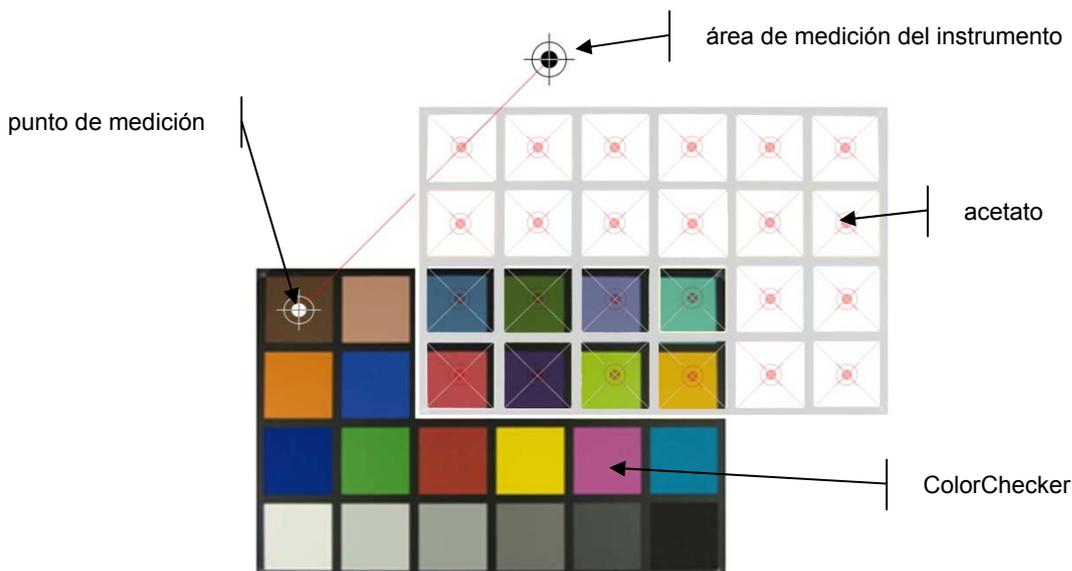


Fig. 3 Esquematización de la superposición acetato/ColorChecker

3.1.2. MEDICIONES COLORIMÉTRICAS Y ELABORACIÓN DE LOS DATOS

3.1.2.1. Los valores espectrofotométricos

Las condiciones de iluminación adoptadas en las mediciones reflejan los parámetros externos programados para el empleo de cámara fotográfica y telecolorímetro: D_{65} . El observador adoptado es el 10° . Estos dos parámetros nos serán útiles al momento de considerar las posibles transformaciones entre diferentes espacios de color. Los valores se han conseguido tanto con SCE como con SCI, pero se han utilizado exclusivamente aquellos adquiridos con componente especular incluida, la única capaz de coincidir con todos los medidores. Todos los datos adquiridos con espectrofotómetro se encuentran en Anexo 1.

3.1.2.2. Los valores telecolorimétricos

Los valores colorimétricos adquiridos son aquellos relativos al espacio CIE-Yxy. Para conseguir los valores en los espacios CIE-XYZ, CIE-Lab y CIE-LCh, se ha utilizado el lenguaje de programación MATLAB, disfrutando las potencialidades de la aplicación OptProp (acrónimo de Optical Properties), versión 2.1. Se trata de un instrumento (*tool*) freeware para efectuar, entre otras cosas, cálculos colorimétricos, desarrollado por Jerker Wågberg en el *More Research* y el *DPC-Digital printing Center* de la Mid Sweden University (Suecia) como parte del proyecto *Interaction between ink and paper* patrocinado por la sueca *Knowledge Foundation*¹⁰.

Las transformaciones de tipo lineal han sido realizadas utilizando el método de adaptación cromática de Bradford previa definición de los parámetros que OptProp requiere para este tipo de transformaciones y empleando adecuadas funciones creadas en entorno MATLAB¹¹. Las transformaciones son consultables en el Anexo 2, mientras que en el Anexo 1 es posible consultar todos los datos originales y los procedentes de las transformaciones.

¹⁰ El *tool* está disponible gratuitamente desde el marzo de 2007 previa inscripción a la sección *file exchange* del sitio web del MathWorks <http://www.mathworks.com/matlabcentral>.

¹¹ BATAGLINO, Sabina; OLEARI, Claudio. "Strumenti matematici della colorimetria". En: AA.VV. *Misurare il colore*, pp. 369-370.

3.1.3. CAPTURA FOTOGRÁFICA, ELABORACIÓN DE LOS RAW Y TRANSFORMACIÓN EN IMÁGENES .TIFF

Se han disparado 5 fotografías consecutivas respetando los parámetros ambientales y las puestas a punto de la fotocámara ya descritos. Cada fotografía es la imagen de la superficie entera del ColorCheker, comprendiendo, por lo tanto, los 24 parches coloreados.

A las imágenes, capturadas en RAW, se ha asignado un perfil definido con CameraRaw:

- A) Balance del blanco: D6500
- B) Brillo: +50
- C) Contraste: +25

Los demás parámetros se han programado a nivel 0.

El valor del balance de blanco se ha elegido teniendo en cuenta la fuente de iluminación D_{65} ; en cambio, brillo y contraste se han elaborado para que las ternas RGB relativas a cada parche pudieran acercarse a los números RGB relativos al ColorChecker definidos por la casa productora. Una vez definido el perfil estándar (que es el que se ha aplicado en los casos concretos) las imágenes RAW han sido guardadas como archivo digital .tiff, definiendo los siguientes parámetros¹²:

- A) Espacio RGB: ProPhoto
- B) Profundidad: 8 bites
- C) Compresión: ausente

3.1.4. OBTENCIÓN Y ELABORACIÓN DE LAS TERNAS RGB CON PHOTOSHOP CS4

En PhotoShop CS4, las 5 imágenes .tiff (llamadas f22, f23, f24, f25 y f26) han sido recortadas a lo largo del perímetro y enderezadas en el sentido acd de 0,3 grados. Para cada parche se han dibujado las diagonales y el píxel yacente sobre el punto de intersección se ha convertido en el píxel central, definido p_1 ¹³, del que extrapolar los números digitales R, G y B.

De esta manera se han conseguido 24 ternas de números RGB por cada fotografía, para luego calcular la desviación estándar y la media aritmética entre las 5 ternas RGB relativas a cada uno de los 24 parches coloreados, consiguiendo así una única secuencia de 24 ternas. Todos los datos están en Anexo 1.

3.1.4.1. Evaluación del promedio y desviación estándar

La evaluación de la desviación estándar ha puesto en relieve cierta falta de homogeneidad entre muestra y muestra, con parches donde los porcentajes de variación se mantienen relativamente bajos (la mayoría) y otros en que desprenden porcentajes muy altos (parches 7 y 8). Interesante destacar como las desviaciones menores y aquellas mayores ocurren respectivamente en los números que se encuentran en el canal G y B¹⁴. De todas formas, la consideración del índice de máxima desviación estándar permite afirmar que en general los valores promedio conseguidos son aceptables¹⁵.

Los números resultantes del cálculo del promedio no necesitarían observaciones específicas si no fuera que, cuando se habla de canales RGB, los números que los representan son expresados con valores que van de 0 a 255 y que siempre son números enteros. Sacando la

¹² Como ya se ha dicho se trata de parámetros arbitrarios que, a parte de la compresión, no influyen en las operaciones de elaboración de los datos que sirven para los objetivos de esta investigación.

¹³ Confrontar el párrafo 2.4.3.

¹⁴ Confrontar las tablas de evaluación del promedio y de la desviación estándar en subpárrafo 3.1.2, Anexo 1.

¹⁵ Todos los cálculos efectuados para la desviación estándar y las ternas RGB resultantes de los cálculos del promedio de las ternas RGB relativos a los 24 parches de todas las cinco fotografías f22,...,f26 se encuentran en Anexo 1.

media entre las series de números enteros propios de cada una de las 5 imágenes, es inevitable que se formen valores no enteros. En nuestro caso esta paradoja no representa un obstáculo, ya que siempre hace falta recordar que los cálculos sobre las variaciones de los colores no serán efectuados entre ternas de números RGB, sino entre ternas de valores colorimétricos (XYZ, Yxy, Lab, LCh). Finalmente, nuestros números RGB se podrían definir números "teóricos" transformables en valores "reales", o bien en valores triestímulo. Estos últimos, y sólo estos últimos, son los valores que interesan a nuestros análisis de tipo colorimétrico.

Cabe recordar que el empleo de Photoshop, independientemente de la versión utilizada, comporta algunas aproximaciones en la definición del píxel central p_1 , así como, en la visualización misma de los números RGB¹⁶.

3.1.5. OBTENCIÓN Y ELABORACIÓN DE LAS TERNAS RGB CON MATLAB

Mientras se puede afirmar que en programas como Photoshop se elaboran imágenes para desarrollar imágenes, y que la posibilidad de elaborar autónomamente los números que la componen son muy limitadas, en el entorno Matlab no se sufre la inevitable imprecisión de elaboraciones efectuadas solamente a nivel gráfico/visual. Por ejemplo: con Photoshop se ha localizado el píxel central (p_1) de cada parche dibujando directamente sobre la imagen las dos diagonales y posicionando el cursor sobre el punto de intersección. La operación, a pesar de ser precisa y efectuada en modalidad de visualización agrandada (400%), ha sido realizada de la única manera posible, es decir, identificando a ojo los píxeles angulares del parche que presentan similitud numérica con los píxeles de las áreas centrales. Estos píxeles de referencia para dibujar las diagonales representan sin embargo una incógnita, porque se encuentran a los límites de una figura digital donde los píxeles de su perímetro se agregan y se superponen con los píxel externos.

Además, debido a que estamos interesados por números y valores y no por imágenes en sí, no nos interesa mantener intacta la imagen de referencia, sino poderla examinar matemáticamente para poderla analizar colorimétricamente.

3.1.5.1 Identificación de las ROI desde las que extrapolar los datos RGB

Cada una de las 5 imágenes .tiff definidas y guardadas con CameraRaw ha sido visualizada con Image Processing, *tool* de MATLAB para procesar y analizar las imágenes.

La ventana del *tool* reconduce las informaciones básicas de cada píxel sobre el que se desplaza manualmente el cursor: coordenadas x (eje horizontal) e y (eje vertical) del píxel y su relativa terna RGB (función: Píxel info).

Agrandando la vista al 1000%, nos hemos desplazado a lo largo de los cuatro ángulos de cada parche, apuntando las coordenadas de los píxeles angulares que presentan homogeneidad de números RGB con respecto a los píxeles del área interior y heterogeneidad con los píxeles del perímetro. Homogeneidad y heterogeneidad entre las ternas RGB resultan evidentes con la lectura del "Píxel info", pero la utilización del panel PÍXEL REGION, donde las ternas pueden ser directamente vistas en imagen, contribuye a evitar errores de posicionamiento del cursor (y, por lo tanto, de lectura de los números).

Con lo dicho tenemos anotadas las coordenadas x,y de los cuatro píxeles angulares de cada parche. Dibujando líneas imaginarias para unir los cuatro píxeles angulares conseguimos un cuadrilátero, cuyos lados presentan medidas diferentes, a causa de la exclusión de aquellos píxeles perimétricos cuyos valores RGB resultan heterogéneos con respecto al promedio de los

¹⁶ Sobre el discurso relativo a la parcialidad de algunas funciones propias de este software consultar el subpárrafo 2.4.3.

valores RGB del área central. La medida (en píxeles) de cada lado es el resultado de la diferencia entre las coordenadas x e y sobre las que yacen los cuatro píxeles de referencia.

En la Tabla 1 se describen las fases de identificación, definición y extrapolación de una ROI, tomando como ejemplo el parche n°16, fotografía 22:

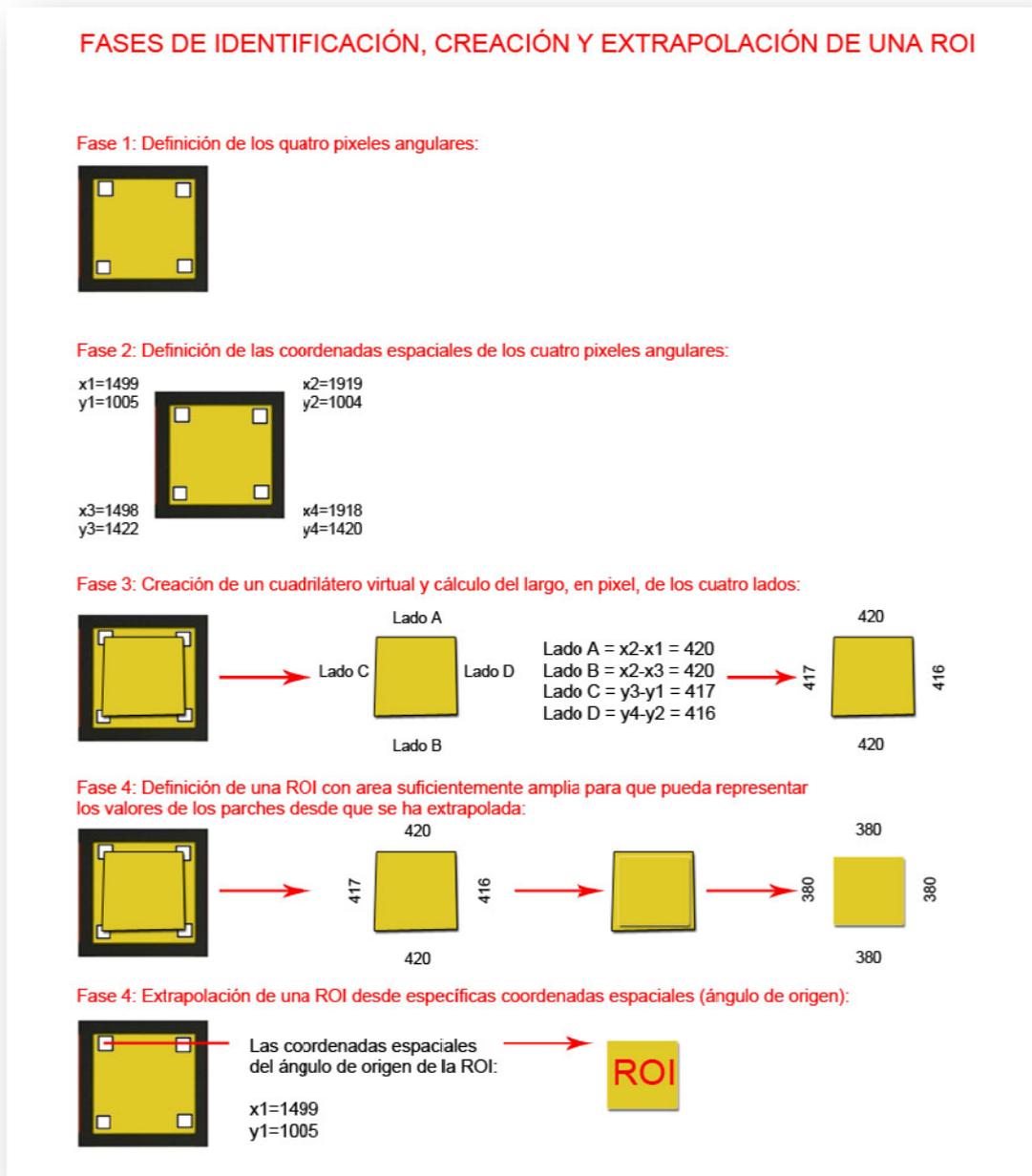


Tabla 1. Extrapolación de una ROI adoptado en este trabajo

Los 24 cuadriláteros virtuales son todos irregulares, aunque hay un intervalo de valores bastante homogéneo: la medida de los lados va desde un mínimo de 406 píxeles (Lados A y D, parche 6) hasta un máximo de 422 píxeles (Lado B, parche 15; Lados A y B, parche 21). La relación entre los cuatro lados de cada cuadrilátero virtual siempre es constante: donde hay lados con valores en el rango 419-422, por ejemplo, no es posible que hayan lados con valores en el rango 406-412.

A partir de estos cuadriláteros irregulares y virtuales se han establecido cuadrados estándar en que la medida de los cuatro lados (=380 píxeles) se ha definido a partir del valor mínimo de 406 píxeles, valor encontrado entre todos los cuadriláteros irregulares, teniendo en cuenta la necesidad de definir Regiones de Interés (ROI) con área suficientemente amplia como para poder representar los valores de los parches de los que han sido extrapoladas (Tabla 1, fase 4). Todos los cálculos ejecutados para definir las ROI se incluyen en el Anexo 3.

3.1.5.2 Extrapolación de las ROI

Establecido que las Regiones de Interés a extrapolar en cada uno de los 24 parches son equivalentes a un cuadrado de lado de 380 píxeles, por convención se ha decidido sacar las ROI a partir del píxel situado en el ángulo superior izquierdo (Tabla 1, fase 5), definido píxel de origen¹⁷.

MATLAB permite crear variables formadas por series vectoriales o matriciales de números. Ya que las imágenes abiertas en MATLAB y en sus *tool* son, ante todo, un conjunto de números (en nuestro caso matrices que representan ternas RGB), cada imagen es definida como una variable. Como las ROI son imágenes extrapoladas de otras imágenes, serán también definidas como variables.

Utilizando la función 'imcrop', para cada fotografía se han extrapolado 24 ROI relativas a los 24 parches coloreados. Como resultado se han conseguido 24 variables (una por cada ROI), más una variable perteneciente a la imagen general del ColorChecker. En total 25 variables a asociar a cada una de las .tiff que han sido agrupadas en conjuntos de variables que llevan la sigla de la fotografía de derivación:

f22 = es el conjunto de variables con referencia a la fotografía 22 que contiene:

- una variable llamada I que es la representación numérica de la fotografía 22
- 24 variables llamadas I1,..., I24 que son la representación de los parches coloreados T1,..., T24 de la fotografía 22

f23 = es el conjunto de variables con referencia a la fotografía 23 que contiene:

- una variable llamada I que es la representación numérica de la fotografía 22
- 24 variables llamadas I1,..., I24 que son la representación de los parches coloreados T1,..., T24 de la fotografía 22

f24 = es el conjunto de variables con referencia a la fotografía 24 que contiene:

- una variable llamada I que es la representación numérica de la fotografía 24
- 24 variables llamadas I1,..., I24 que son la representación de los parches coloreados T1,..., T24 de la fotografía 24

f25 = es el conjunto de variables con referencia a la fotografía 25 que contiene:

- una variable llamada I que es la representación numérica de la fotografía 25
- 24 variables llamadas I1,..., I24 que son la representación de los parches coloreados T1,..., T24 de la fotografía 25

f26 = es el conjunto de variables con referencia a la fotografía 26 que contiene:

- una variable llamada I que es la representación numérica de la fotografía 26
- 24 variables llamadas I1,..., I24 que son la representación de los parches coloreados T1,..., T24 de la fotografía 26

¹⁷ GONZALEZ, Rafael C.; WOODS, Richard E.; EDDINS, Steven L. *Digital image processing using MATLAB*®, pp65-66. Para profundizar sobre la definición, la elaboración y la extrapolación de Region Of Interest en una imagen digital, se aconseja además la lectura de la guía de referencia de MATLAB.

3.1.5.3. Ternas RGB obtenidas por el píxel central (p_1) de las ROI

Se ha dicho que en MATLAB cada imagen RGB es almacenada como una variable de orden bidimensional, donde cada elemento corresponde a un píxel, que, a su vez, contiene una terna de números RGB. Tenemos, por lo tanto, la posibilidad de seleccionar cualquier píxel como si fuera un elemento matricial, visionando y almacenando al mismo tiempo los números R, G y B que contiene. Por ejemplo, la función básica $I(x,y)$ devuelve el píxel situado en las coordenadas espaciales x (fila) e y (columna) de la imagen (matriz) I .

Considerado que las ROI son cuadrados de 380 píxeles de lado, para leer el píxel central las coordenadas a introducir serán:

$x = 190$

$y = 190$

El p_1 ha sido calculado utilizando la función 'impíxel', siendo extrapolado desde las variables $I1, \dots, I24$ presentes en cada uno de los conjuntos de variables $f22, \dots, f26$ antes descritos. El resultado son 24 ternas RGB relativas a las 24 ROI de cada fotografía. En este caso, las variables asignadas a cada terna se han llamadas $p1, \dots, p24$. Al conjunto de variables que las contiene se ha asignado un nombre en relación a la fotografía de derivación:

RGB_f22: conjunto de variables $p1, \dots, p24$ que contienen un vector de tres números RGB relativo al píxel central (p_1)

RGB_f23: conjunto de variables $p1, \dots, p24$ que contienen un vector de tres números RGB relativo al píxel central (p_1)

RGB_f24: conjunto de variables $p1, \dots, p24$ que contienen un vector de tres números RGB relativo al píxel central (p_1)

RGB_f25: conjunto de variables $p1, \dots, p24$ que contienen un vector de tres números RGB relativo al píxel central (p_1)

RGB_f26: conjunto de variables $p1, \dots, p24$ que contienen un vector de tres números RGB relativo al píxel central (p_1)

El resultado es la obtención de las ternas RGB relativas a los píxeles centrales de cada parche por cada una de las 5 fotografías, cuya tabla de referencia se puede consultar en Anexo 1, subpárrafo 3.2.

Para terminar, ha sido ejecutado el promedio entre los resultados de las 5 fotografías, consiguiendo una variable (matriz) de 24×3 , que representa los valores medianos de cada píxel p_1 para cada parche. Se ha llamado esta variable $RGB_MEDIApíxel$. A continuación se ha calculado la desviación estándar sobre el promedio.

3.1.5.3.1. Promedio y desviación estándar

También para las ternas RGB relativas al p_1 conseguidas con MATLAB la desviación estándar ha puesto en relieve falta de homogeneidad entre las muestras. El cálculo del porcentaje de desviación estándar, además, exhibe variaciones de orden mayor con respecto a aquellos observados en los números tomados con Photoshop. De todos modos, en general se subraya como también para estas ternas las desviaciones menores y aquellas mayores ocurren respectivamente en los números que se encuentran en el canal G y B¹⁸. El cálculo del índice de máxima desviación estándar permite afirmar que en general los valores medianos conseguidos por las 5 imágenes son fiables.

¹⁸ Consultar las tablas de evaluación de promedio y desviación estándar en el subpárrafo 3.2.2, Anexo 1.

3.1.5.4. Ternas RGB obtenidas por una serie de píxeles centrales (p_s) de la ROI

En la Tabla 2 se incluyen las tres tipologías de relaciones de vecindad existentes entre píxeles. En relación a estos tipos de adyacencia tenemos definidos tres tipologías de contornos de un píxel¹⁹.

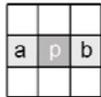
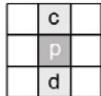
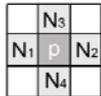
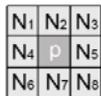
RELACIONES DE VECINDAD ENTRE PÍXELES	
	<p>1) Adyacencia horizontal: un píxel (p) de coordenadas x e y [$p(x,y)$] tiene dos píxeles horizontales que tendrán por coordenadas: $a(x-1,y)$ y $b(x+1,y)$</p>
	<p>2) Adyacencia vertical: un píxel $p(x,y)$ tiene dos píxeles cercanos vertical que tendrán por coordenadas: $c(x,y-1)$ e $d(x,y+1)$</p>
	<p>3) Adyacencia diagonal: un píxel $p(x,y)$ tiene 4 píxeles cercanos en diagonal tendrán por coordenadas: $e(x-1,y-1)$, $f(x+1,y-1)$, $g(x-1, y+1)$, $h(x+1, y+1)$</p>
TIPOS DE CONTORNO DE UN PÍXEL	
	<p>1) Contorno de orden 4: formado por los píxeles adyacentes horizontales y verticales: [$N4(p)$]</p>
	<p>2) Contorno de orden 4 diagonal: formado por los 4 píxeles adyacentes diagonales al píxel p: [$ND(p)$]</p>
	<p>3) Contorno de orden 8: formado por todos los píxeles adyacentes al píxel p: [$N4(p)+ND(p)$]= $N8(p)$</p>

Tabla 2. Los píxeles: relaciones de vecindad y contorno

Tratándose de la solución más completa, en la individuación de la serie de píxeles simétricos, se ha elegido el contorno de orden 8 (el último representado en la Tabla 2), por lo cual los píxeles contenidos en la p_s serán 9. Siempre teniendo en cuenta el hecho de que las mediciones con telecolorímetro y con espectrofotómetro han sido efectuadas sobre el área

¹⁹ ALEGRE GUTIÉRREZ, Enrique, y otros. *Procesamiento digital de imagen : fundamentos y prácticas con MATLAB*, pp. 63-64.

central de las ROI, el píxel de referencia (es decir, central) de nuestra serie p_s es lo que se ha definido como p_1 , yacente sobre las coordenadas $x= 190$, $y = 190$ del ROI²⁰.

En MATLAB tenemos así definida una región de nueve píxeles adyacentes por cada parche de cada imagen. Las variables sobre las que se ha trabajado son las $I1, \dots, I24$ contenidas en los cinco conjuntos de variables $f22, \dots, f26$ ²¹. Para cada una de las regiones definidas - y a partir de las coordenadas del p_1 - se han localizado las coordenadas de los píxeles yacentes sobre el contorno de orden 8 y utilizando la función 'impíxel' hemos conseguido una variable llamada ppn . Esta variable es una matriz de 9×3 (nueve píxel por 3 números R, G y B). Las variables $pp1, \dots, pp24$ están contenidas en un conjunto llamado RGB_ROI_fn , dónde fn indica la fotografía de origen.

A partir de las variables $pp1, \dots, pp24$, sucesivamente se ha utilizado la función 'mean' para sacar el promedio de los números RGB de todas las regiones de 9 píxeles. Así se han obtenido variables de 1×3 (una región de nueve píxeles por 3 números R, G y B) que se ha nombrado $fnpromedio1, \dots, fnpromedio24$ (dónde fn indica la fotografía de origen) y guardado como conjunto de variables, llamado $fnpromedioROI$ (dónde fn indica siempre la fotografía de origen)²². Finalmente, se ha calculado el promedio entre los resultados de las 5 imágenes, obteniendo una variable (matriz) de 24×3 , que representa los valores promedios de cada región de 9 píxel por cada parche. Esta variable ha sido llamada $RGB_MEDIAPíxelROI$.

En el Anexo 1 pueden consultarse los números digitales RGB así obtenidos por cada parche de cada fotografía, el promedio entre éstos, las desviaciones estándar y sus evaluación.

3.1.5.4.1. Promedio y desviación estándar

El cálculo de la desviación estándar sobre el promedio de las 24 ternas obtenidas por cada imagen, resultado del promedio elaborado a partir de áreas de 9 píxel contiguos, ha puesto en relieve cierta homogeneidad entre los números RGB.

Comparando las tablas conseguidas en Photoshop CS4, la obtenida en MATLAB, a través del promedio de los píxeles centrales (p_1), y aquella recientemente examinada, es esta última la que presenta un promedio más uniforme entre los números de las cinco fotografías. El cálculo del porcentaje de desviación estándar enseña efectivamente variaciones en general muy reducidas con respecto a los cálculos efectuados sobre los otros promedios. Además, la diferencia entre valores de desviación estándar está comprendida en un rango estrecho: 15,27% - 15,83% en términos de porcentaje de la desviación estándar; y 0,763739-0,791772 en términos de promedio de las desviaciones estándar para cada canal R, G, B.

A diferencia de las otras dos series de ternas conseguidas, las desviaciones menores y mayores no ocurren respectivamente en los canales G y B sino en B y G.

Todos los cálculos y los resultados se encuentran en Anexo 1, subpárrafo 3.3. y siguientes.

3.1.6 CREACIÓN DE LA TABLA DE CALIBRACIÓN COLORIMÉTRICA PARA LA CÁMARA FOTOGRÁFICA NIKON D50

En los párrafos anteriores hemos conseguido tablas de 24 ternas numéricas relativas a 24 parches coloreadas. Cada una de estas tablas ha sido desarrollada a través cálculos

²⁰ Se vea en este capítulo el subpárrafo 4.5.3.

²¹ Confrontar subpárrafo 4.5.2 en este capítulo.

²² Por comodidad de elaboración, en este mismo conjunto se ha guardado una variable que hemos llamado $fnpromedio$ que recoge una matriz 24×3 o bien 24 muescas por 3 números R, G y B.

efectuados tanto en entorno EXCEL como en entorno MATLAB, por lo que hablamos de tablas 24x3 o matrices 24x3, según el entorno en que trabajemos.

Además, vale la pena recordar como no todas las tablas presentan el mismo sentido en los números que expresan:

- por una parte tenemos dos tablas donde las ternas representan valores colorimétricos expresados en los espacios de color CIE (para nuestra calibración utilizaremos el espacio CIE-XYZ);
- por otra, tres tablas donde las ternas representan números digitales RGB.

Las tablas a nuestra disposición son, por lo tanto:

- 1) tabla espectrofotómetro
- 2) tabla telecolorímetro
- 3) tabla RGB Photoshop CS4
- 4) tabla RGB Matlab, píxel central (p_1)
- 5) tabla RGB Matlab, serie de píxeles centrales adyacentes (p_s)

A continuación se ha valorado qué tablas utilizar para poder conseguir una calibración colorimétrica con altos márgenes de fiabilidad. El método de valoración elegido ha sido el coeficiente de correlación, aplicado en base a las evaluaciones e hipótesis expresadas en el subpárrafo 2.4.3.

La preguntas que queremos contestar son:

- 1) Con relación a los números digitales RGB conseguidos indiferentemente con Photoshop o con MATLAB, ¿qué valores colorimétricos presentan un coeficiente de correlación mayor: los del espectrofotómetro o los del telecolorímetro?
- 2) Con relación a los valores colorimétricos resultantes más idóneos, ¿qué números digitales RGB presentan un coeficiente de correlación más alto entre los conseguidos en Photoshop y los obtenidos en MATLAB (píxel central p_1)?
- 3) Optativo: En caso que los números digitales RGB obtenidos en MATLAB resultaran más idóneos, ¿es preferible utilizar las ternas derivadas del promedio de los píxeles centrales (p_1) o las ternas derivadas de la serie de 9 píxeles centrales (p_s)?

3.1.6.1 Análisis de las tablas y sus relaciones. Resultados

Los coeficientes de correlación han sido analizados entre tablas correspondientes a las siguientes opciones²³:

A1 - Datos colorimétricos espectrofotómetro / números digitales obtenidos con Photoshop CS4 (píxel central);

A2 - Datos colorimétricos telecolorímetro / números digitales obtenidos con Photoshop CS4 (píxel central);

B1 - Datos colorimétricos espectrofotómetro / números digitales obtenidos con MATLAB (píxel central p_1),

B2 - Datos colorimétricos telecolorímetro / números digitales obtenidos con MATLAB (píxel central p_1).

²³ Tablas, cálculos, resultados y observaciones son consultables en Anexo 4.

RESULTADO 1: ESPECTROFOTÓMETRO/TELECOLORÍMETRO

Relación entre los elementos de 'A1': coeficiente de correlación **0,949368**

Relación entre los elementos de 'A2': coeficiente de correlación **0,956413**

Relación entre los elementos de 'B1': coeficiente de correlación **0,949921**

Relación entre los elementos de 'B2': coeficiente de correlación **0,957175**

El coeficiente de correlación más alto entre los elementos integrados en los grupos relacionables A2 y B2 confirma la hipótesis por la que los valores colorimétricos obtenidos con telecolorímetro presentan una relación más estrecha (más idónea) con la terna digital RGB derivada de la elaboración de las fotografías del patrón, prescindiendo de como haya sido obtenida (Photoshop CS4 o MATLAB). En todo caso, cabe destacar como la diferencia entre utilización de los valores XYZ espectrofotométricos y telecolorimétricos es mínima: A1-A2 = **0,007045** y B1-B2 = **0,007254**.

RESULTADO 2: PHOTOSHOP CS4/MATLAB (PÍXEL CENTRAL p_1)

A2 = coeficiente de correlación **0,956413**

B2 = coeficiente de correlación **0,957175**

El valor de correlación más alto dado por la relación entre los elementos presentes en B2 confirma que las ternas RGB obtenidas con la elaboración en MATLAB son las más precisas con respecto a las obtenidas con Photoshop CS4.

Este resultado ha inducido a evaluar también cual de las ternas digitales RGB obtenidas en MATLAB pueden resultar más precisas, es decir averiguar el coeficiente de correlación entre la tabla de los valores colorimétricos del espectrofotómetro y del telecolorímetro y los números RGB en MATLAB derivados del píxel central (p_1) o de la serie de píxeles (p_s).

- En cuanto a la relación entre los "VALORES TELECOLORÍMETRO / NÚMEROS DIGITALES OBTENIDOS CON MATLAB (SERIE PÍXELES CENTRALES P_s)", que indicamos con C, el coeficiente de correlación es **0,957006**.

- En cuanto a la relación " VALORES ESPECTROFOTÓMETRO / NÚMEROS DIGITALES OBTENIDOS CON MATLAB (SERIE PÍXELES CENTRALES P_s)", que indicamos con D, el coeficiente de correlación calculado es **0,950017949**²⁴.

En ambos casos, tanto utilizando los valores espectrofotométricos como telecolorimétricos, la diferencia entre utilización de números RGB derivados de píxel central (casos B1 y B2) o del promedio de una serie de píxeles centrales (casos C y D) resulta infinitesimal. El porqué pudiera residir en la naturaleza misma de los parches coloreados del patrón ColorChecker, producidos para que la superficie de cada parche tenga un máximo grado de homogeneidad en el color.

A pesar del mejor coeficiente de correlación en general encontrado con respecto a las ternas derivadas desde un único píxel central (p_1), se ha elegido la opción p_s por las siguientes motivaciones:

- 1) una diferencia imperceptible entre las dos ternas RGB (coeficiente de correlación igual a **0,999935643**);
- 2) el área de medición de un instrumento colorimétrico es considerablemente más amplia que el tamaño de un único píxel (en nuestro caso el área de medición del espectrofotómetro tiene un diámetro de 5 mm);

²⁴ Idem.

3) en situaciones reales de medición sobre superficies coloreadas difícilmente nos vamos a encontrar superficies homogéneas como las de un patrón de calibración;

Por lo dicho, se cree preferible adoptar un sistema que apriorísticamente tenga en cuenta las muchas variables verificables sobre una superficie y, por lo tanto, en los píxeles que la representan en un entorno digital.

Subrayar que también la diferencia entre relaciones C y D es infinitesimal: **0,006988264**.

3.1.6.2. Tabla de calibración colorimétrica para la Nikon D50

El resultado de los cálculos y las consideraciones hechas en el párrafo anterior nos inducen a establecer dos tablas diferentes para calibrar colorimétricamente nuestra reflex digital Nikon D50, donde los números RGB son los derivados con MATLAB de una serie de píxeles centrales y los valores XYZ son a su vez los del espectrofotómetro y del telecolorímetro:

TABLAS DE CALIBRACIÓN COLORIMÉTRICA									
Parche	ESPECTROFOTÓMETRO			NIKON D50/MATLAB			TELECOLORÍMETRO		
	X	Y	Z	R	G	B	X	Y	Z
1	11,7152	10,6829	7,4084	60,6	52	35,35556	10,9907	11,40703518	5,3566
2	36,2651	34,2059	24,5461	140,2	119,0222	90,91111	35,6608	35,92964824	18,0096
3	17,7886	19,5292	33,9533	70,08889	79,57778	103,0444	15,5969	19,67336683	23,8089
4	11,2069	13,5016	7,237	58,84444	73,55556	33,68889	10,9020	16,58291457	5,3525
5	24,7014	24,3659	43,5424	95,2	92,71111	125,1333	21,9473	24,49748744	30,8344
6	31,569	42,8437	43,8136	117,5111	153,9778	131,3556	29,0550	46,98492462	31,9714
7	36,6779	28,8746	6,5398	155,2889	114,2222	44,71111	36,7846	31,90954774	5,1705
8	13,9817	13,2446	40,3855	56,91111	54	120,4889	11,5255	11,7839196	28,3744
9	26,318	18,2963	13,3469	125	74,31111	59,24444	27,8427	20,1758794	9,6268
10	8,6336	7,0637	14,9031	44,4	35,95556	59,42222	7,3080	7,060301508	10,4047
11	33,9175	42,3028	10,9112	140,2	169,5333	61,93333	33,5075	51,75879397	8,3301
12	43,4505	39,2771	7,5863	169,9778	155,1111	51,06667	44,4327	48,99497487	5,7524
13	8,0596	7,2313	28,426	37,77778	35,06667	99,86667	6,6509	6,281407035	20,6581
14	15,1619	22,9678	9,6895	85,57778	123,8222	56,44444	15,2485	28,3919598	7,7013
15	18,7019	11,9468	5,4129	101,2444	58,37778	34,51111	19,5855	13,5678392	4,2236
16	55,7719	57,0004	8,6793	190,1111	189,7778	56,4	56,8944	69,84924623	6,8113
17	28,832	20,1834	32,0035	128,1778	80,48889	113,4667	27,4233	20,60301508	23,0185
18	15,0924	21,2958	39,2796	72,06667	100	132,1556	13,8106	21,00502513	29,4199
19	83,7923	88,703	92,4279	218,2	221,5556	206	81,6121	100	70,2771
20	55,358	58,5759	62,7621	181,1556	185,6222	171,6	53,8299	65,82914573	46,9970
21	34,6176	36,6322	39,6884	138,2667	141,8	129,3778	33,4896	40,95477387	29,2386
22	18,3055	19,2952	20,6005	90,55556	92,44444	82,68889	17,5483	21,38190955	15,0645
23	8,8433	9,3961	10,292	58,44444	60,66667	54,13333	8,9046	10,92964824	7,9060
24	3,1775	3,3539	3,6878	26,53333	27,31111	24,64444	3,1816	3,91959799	2,8724

Tabla 3. Tablas de calibración colorimétrica por fotocámara Nikon D50

Estas tablas nos servirán para conseguir, por interpolación y por transformación, valores colorimétricos leíbles a través del procesado y análisis de imágenes digitales.

3.2. ANÁLISIS COLORIMÉTRICO DE MUESTRAS COLOREADAS

3.2.1. ELECCIÓN Y PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

La segunda fase de la investigación ha servido para averiguar la autenticidad del proceso analítico experimentado sobre una superficie coloreada: empleo de la fotocámara calibrada, elaboración de imágenes digitales, obtención de datos numéricos RGB y transformación en valores colorimétricos y, para terminar, análisis de las variaciones de color.

En laboratorio se ha reproducido un revoque coloreado extendido sobre ladrillo tradicional valenciano. La elección de los materiales de revestimiento y soporte se basa en los estudios encaminados a partir de los años noventa en el casco antiguo de Valencia, en los barrios del Carmen y Veulleuters, que han concluido con la redacción de una Carta del Color que se ha convertido en guía de referencia para las intervenciones sobre el antiguo tejido urbano de la ciudad. Los estudios sobre el color de las fachadas de los edificios históricos han evidenciado en la utilización de los revocos un neto predominio de los tonos almagra y ocre. En el casco antiguo de Valencia, además, ha sido muy difuso el empleo de revoque pintado a la catalana²⁵.

Sobre un ladrillo compacto tradicional de medidas 22,5x11 cm hemos tendido uniformemente una mano de "arriccio" (altura 1cm) compuesto por cal y arena fina en proporción 1:2. El revoque coloreado ha sido preparado con ocre número 13, inerte a base de polvo de mármol dolomítico y cal aérea, y superpuesto sobre el "arriccio" todavía húmedo y previamente fratasado²⁶. El color final del ladrillo enlucido representa nuestro tono de referencia.

Sobre la superficie enlucida se han delimitado ocho áreas cuadradas de 2x2cm, donde la primera representa el color tomado como original. Puesto que el objetivo de este trabajo no es determinar procesos de alteración químico-físicos de uno o más materiales, sino probar y valorar el empleo de nuevas técnicas de monitorización del cambio de color, se ha establecido crear un grupo de siete tonos que pudiera representar arbitrariamente un proceso de cambio de color hipotéticamente sufrido en el tiempo.

Para aparentar muchos estados de cambio del color originario ha sido preparada la siguiente pintura acrílica:

- 1) aglutinante: 1 volumen de ALKYL Prager concentrado : 3 volúmenes agua
- 2) pigmento: 3 volúmenes de pigmento ocre :1 volumen de pigmento blanco de titanio

Para conseguir tonos progresivamente más claros se han sumado de vez en vez 9 volúmenes de blanco de titanio. Esta cantidad aparentemente elevada ha sido determinada en base a una serie de pruebas empíricas, con el objetivo de determinar una simulación de variación identificable a simple vista.

En la figura 4 es posible visionar, tanto las pruebas color efectuadas (izquierda), como las áreas finales elegidas como muestras (derecha hacia arriba).

²⁵ GARCÍA, Ángela, et al. *El color en el barrio de Velleuters*, 2000 y, GARCÍA, Ángela, et al. *El color del centro histórico. Arquitectura en el Barrio del Carmen de Valencia*, p.60. "Si el color se incorpora en la preparación de la pasta homogéneamente para toda ella y queda en seco se le llama revoco a la catalana. Si el color se incorpora cuando el revoco está tendido y todavía fresco, a la manera de los italianos, se le llama revoco a la madrileña o al fresco".

²⁶ Idem, pp. 55-61.



Figura 4. Pruebas de color y muestras finales (detalle)

3.2.2. CONDICIONES E INSTRUMENTACIÓN PARA LA MEDICIÓN

Las condiciones y parámetros ambientales y la puesta a punto de la cámara fotográfica son las mismas determinadas en la fase de proceso de calibración colorimétrica de la Nikon D50.

3.2.3. ELABORACIÓN Y ANÁLISIS DE LAS IMÁGENES

Se ha determinado disparar una secuencia de cinco fotografías iguales. Cada imagen comprende:

- 1) un *área de interés* equivalente al área dónde están las muestras de color a analizar;
- 2) un *área de hipotética distorsión focal* situada a lo largo del perímetro externo de la fotografía;
- 3) un *área de redundancia* equivalente al espacio entre *área de interés* y *área de hipotética distorsión focal*.

Se ha optado por un enfoque que fuera bien más allá del *área de interés*, ya que nos va a permitir evitar la distorsión focal propia de los objetivos fotográficos. Las muestras de color han sido numeradas del 1 al 8, teniendo en cuenta que el número 1 representa la muestra de color originario y los siete restantes representan la simulación de cambio progresivo de éste.



Figura 5. El enfoque final de las imágenes con la subdivisión en distintas áreas y la numeración de las muestras de color

3.2.3.1. Elaboración con CameraRaw y Photoshop CS4

A las cinco imágenes RAW ha sido asignado el mismo perfil, es decir, lo definido por los disparos fotográficos utilizados en el proceso de calibración:

- A) Balance de lo blanco: D6500;
- B) Brillo: +50;
- C) Contraste: +25

Todos los otros parámetros han sido programados a valor 0. Las imágenes han sido guardadas en archivo .tiff, utilizando los siguientes parámetros:

- A) Espacio RGB: ProPhoto;
- B) Profundidad: 8 bites;
- C) Compresión: ausente

Las fotografías en archivo .tiff han sido elaboradas para conseguir otras imágenes con las mismas características ante descritas pero cortando las áreas ya definidas *de hipotética distorsión focal y de redundancia*. El corte ha sido efectuado en el ángulo superior izquierdo posicionando el punto 0 del cursor regla de la pantalla Photoshop sobre el ángulo del *área de interés* y posicionando luego las líneas guías horizontal y vertical en correspondencia del nuevo punto 0.

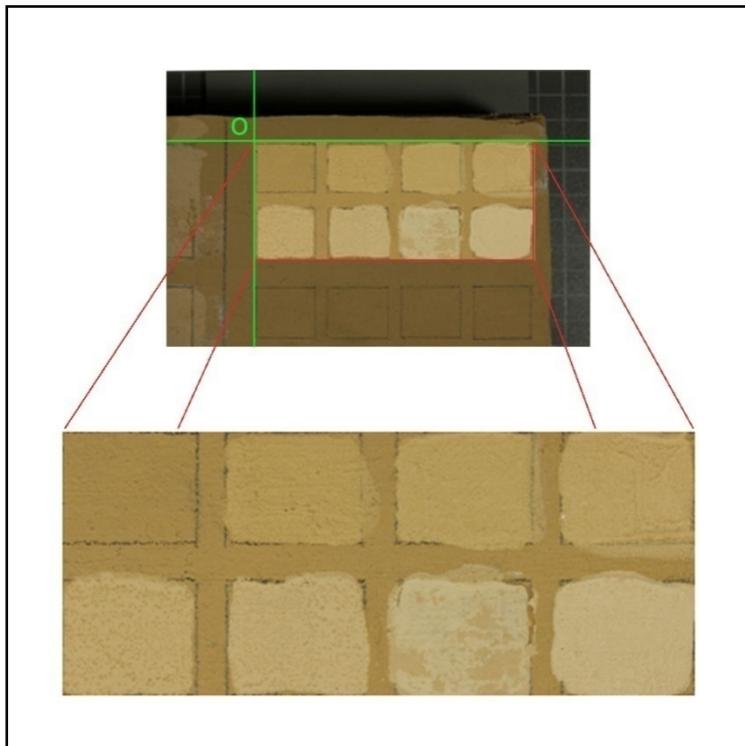


Figura 6. Obtención imagen para determinación números RGB

Por lo tanto tenemos:

- A) 5 fotografías RAW nominadas según el estándar Nikon: DSC_1, ..., DSC_5;
- B) 5 imágenes .tiff derivadas de las RAW, llamadas: Ladrillof1, ..., Ladrillof5;
- C) 5 imágenes .tiff representantes el *área de interés* derivadas de las 5 al punto B) y llamadas: Muestra1, ..., Muestra5.

Estas últimas son las imágenes sobre que se ha trabajado para obtener los números RGB.

3.2.3.2. Elaboración con MATLAB

Se han elaborado las imágenes Muestra1,..., Muestra5 en MATLAB utilizando el *tool* Image Processing. La primera elaboración ha consistido en individualizar una ROI, representativa de la superficie coloreada a analizar, por cada muestra-color.

3.2.3.2.1. ROI localizada para cada muestra coloreada

Los cálculos se han efectuado sobre las muestras de color en la imagen Muestra1 y luego averiguando los resultados sobre las otras cuatro imágenes Muestra2,...,Muestra5. A diferencia de las ROI extrapolada desde los parches del ColorChecker²⁷, las muestras de revoque no presentan una homogeneidad de superficie y una uniformidad de color que permita distinguir visualmente los píxeles afines. Eso es especialmente evidente cuando se aumenta considerablemente la imagen. La Region de Interés intenta representar esta no uniformidad difusa.

A continuación se ha optado por aislar una región a partir del ángulo de origen (superior izquierdo) de cada uno de los parches.

Para evitar la superposición de píxeles del área de una muestra con los píxeles del borde que lo delimita (dibujado con lápiz en fase de preparación del revoque coloreado) y para evitar encuadrar áreas no coloreadas, se ha optado por definir, de manera arbitraria, una distancia donde poner el ángulo de origen de cada ROI. La distancia definida es igual a: x(75), y(40). También de manera arbitraria, pero teniendo en cuenta lo dicho, la medida de los lados de las ROI se ha fijado a 250 píxeles, consiguiendo así regiones cuadradas. Es decir, para cada imagen se han recortado las ROI utilizando el mando 'imcrop'²⁸ sobre la base de las siguientes coordenadas espaciales:

1= x(75) y(40)

2= x(575) y(40)

3= x(1095) y(40)

4= x(1601) y(40)

5= x(75) y(496)

6= x(575) y(496)

7= x(1095) y(496)

8= x(1601) y(496)

²⁷ Consultar subpárrafo 3.1.5.1.

²⁸ Consultar subpárrafo 3.1.5.2.

Las ROI obtenidas se han guardado en MATLAB como variables llamadas M1,...,M8 contenidas en un conjunto llamado ROI_Muestra.

3.2.3.3 Análisis de la superficie coloreada

Simulando un proceso de deterioro del color se han producido diferencias de homogeneidad superficial que caracterizan todas las muestras y que en algunos casos (muestras 5 y 7) pueden asumir carácter prelevante.

Desde el punto de vista colorimétrico, obviamente, esta falta de homogeneidad comporta dificultades de análisis con relación a las ternas RGB, que deberían ser extraídas para representar el color de la muestra analizada. La no uniformidad de color, sin embargo, es un óptimo banco de pruebas para evaluar la eficacia de las elaboraciones y los cálculos efectuados sobre los números digitales RGB.

Además de las comparaciones propiamente colorimétricas, se ha intentado también evaluar la posibilidad de analizar los cambios de color disfrutando de las posibilidades ofrecidas en la actualidad por el procesamiento digital de imagen. Muy interesante se ha revelado, por ejemplo, trabajar sobre la intensidad de los píxeles para averiguar el nivel de homogeneidad de color, para hacer comparaciones entre áreas heterogéneas de color, para aislar y analizar áreas con picos de intensidad en rangos determinados. En el mismo sentido, se ha evaluado también la elaboración y el análisis de histogramas de las frecuencias R, G y B, calculados a lo largo de especificables áreas de las ROI. En la tabla 4 se puede evaluar una comparación hecha entre las muestras 1 y 7 de la imagen Muestra1 utilizando los histogramas RGB y gráficos 3D relativos a las intensidades de cada píxel de las ROI. Ya que excede del objetivo de la tesis de Máster, este último tipo de análisis ha sido desarrollado en Anexo VII.

En los párrafos siguientes se ha definido qué ternas adoptar, tanto en base a parámetros espaciales (como los efectuados con los parches del ColorChecker), como en base a la afinidad entre ternas, es decir filtrando y excluyendo aquellos píxeles con valores absolutamente incompatibles.

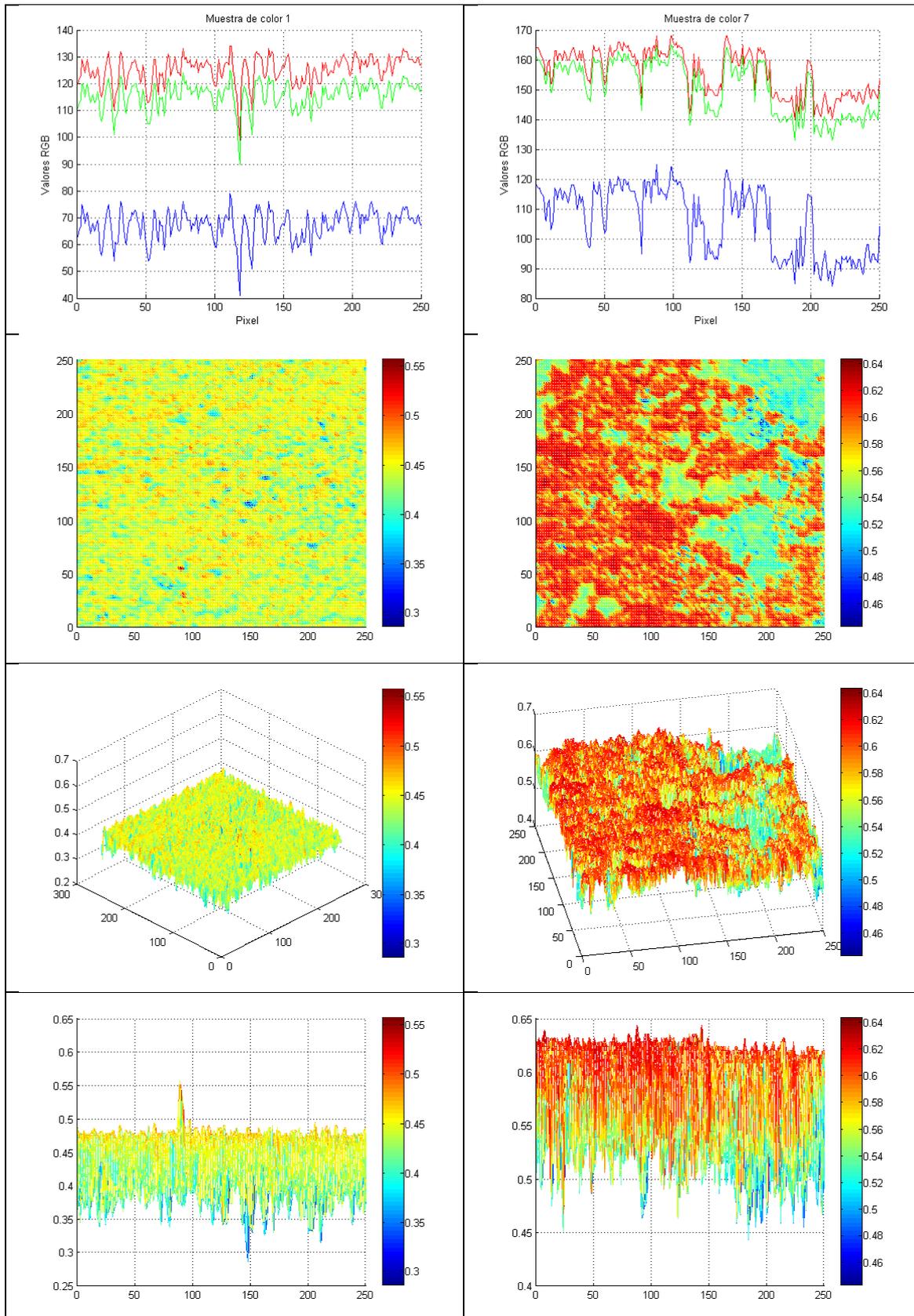


Tabla 4. Comparación entre muestras M1 y M7: histogramas RGB y intensidad píxeles

3.2.3.4 Definición de las ternas RGB y obtención de valores colorimétricos

Por las mismas consideraciones expuestas en el párrafo anterior se ha decidido descartar la hipótesis de extraer las ternas RGB de un único píxel central (p_1), ya que, habría sido restrictivo y desviante con respecto de la complejidad con que se presentan los píxeles de las muestras. Se ha optado por el cálculo del promedio de todos los píxeles que componen la ROI y por el cálculo del promedio de una serie de píxeles (p_s) a partir del píxel central p_1 , eso sí, ampliando el contorno de orden 8 ya definido. Para terminar, desde las ternas obtenidas se han hecho las conversiones para obtener ternas colorimétricamente válidas.

3.2.3.4.1. RGB obtenidas de la media de todos los píxeles de las ROI

Para cada una de las muestras de cada una de las 5 imágenes se ha sacado el promedio de los números digitales R, G y B utilizando la función 'mean2'²⁹. Las ternas de cada muestra se han guardado como variables llamadas M1mediaRGB,...,M8mediaRGB. Además, para favorecer también los cálculos en entorno Excel, se ha guardado una variable con los números RGB de las ocho muestras, llamada M1_8mediaRGB. Todas estas variables se han agrupado en 5 conjuntos, uno para cada imagen Muestra1,...,Muestra5, llamado MediaRGB.

	Muestra1			Muestra2			Muestra3		
Parche	R	G	B	R	G	B	R	G	B
1	124,696	115,4041	66,8205	124,2003	115,0247	66,52349	124,4078	115,243	66,73747
2	139,9373	131,5233	77,9439	139,7506	131,3464	77,77898	139,7906	131,4504	77,87965
3	144,5134	136,7961	84,0873	144,6403	136,8759	84,03024	144,5572	136,9026	84,10795
4	147,6968	139,4648	87,564	148,0915	139,7568	87,66214	147,8437	139,6456	87,65565
5	152,1822	144,942	94,5226	151,7679	144,5727	94,25237	151,8933	144,7786	94,42904
6	154,8565	148,5421	99,4655	154,7452	148,4507	99,3525	154,7206	148,516	99,44864
7	155,8984	151,4972	107,1824	156,1417	151,6794	107,2676	156,0853	151,7593	107,3975
8	162,2813	157,4439	113,1296	162,8503	157,8644	113,4117	162,574	157,7382	113,3696
	Muestra4			Muestra5			PROMEDIO		
Parche	R	G	B	R	G	B	R	G	B
1	123,8066	114,6717	66,34411	123,5693	114,4762	66,20869	124,136	114,9639	66,52685
2	139,2098	130,9031	77,51085	138,9967	130,7154	77,35128	139,537	131,1877	77,69293
3	143,9697	136,3159	83,66042	143,7554	136,1136	83,53186	144,2872	136,6008	83,88355
4	147,3272	139,1293	87,25094	147,0982	138,9376	87,11072	147,6115	139,3868	87,44869
5	151,3313	144,2144	93,94445	151,0901	143,9961	93,78563	151,653	144,5008	94,18682
6	154,1443	147,922	98,95181	153,92	147,7235	98,76286	154,4773	148,2309	99,19626
7	155,3315	150,9362	106,6089	155,1133	150,741	106,432	155,714	151,3226	106,9777
8	161,9268	157,0625	112,7273	161,7201	156,8969	112,5538	162,2705	157,4012	113,0384

Tabla 5. Media RGB todos los píxeles (250x250)

Además, para cada imagen se ha creado un conjunto llamado DevStRGB, que contiene los resultados del cálculo de la desviación estándar efectuada sobre el promedio utilizando la función 'std2'³⁰. En entorno Excel se ha sacado el promedio entre las ternas RGB de cada imagen, con cálculo de la desviación estándar y su evaluación, positiva, por el índice máximo de desviación estándar. Todos los cálculos y los resultados efectuados en MATLAB se encuentran en el Anexo 1, párrafo 3.5 y siguientes.

²⁹ Esta función permite de sacar la media de números dispuestos en orden matricial.

³⁰ Esta función permite de calcular la desviación estándar de números dispuestos en orden matricial.

3.2.3.4.2. RGB obtenidas de la media de los píxeles de la región central de la ROI

Se han elegido las ternas RGB de 25 píxeles localizados a partir del píxel central p_1 , que se encuentra en las coordenadas espaciales $x(125)$, $y(125)$ ³¹. Los píxeles que forman parte de esta serie (p_s) están dispuestos teniendo en cuenta el contorno de orden 8, al que se han sumado otros 16 píxeles obteniendo un cuadrado de lado 5×5 ³².

Utilizando en entorno MATLAB la función 'impíxel', se han creado, para cada imagen, variables llamadas M1roi,...,M8roi con relación a las ocho muestras que contienen las 25 ternas RGB. Utilizando la función 'mean' desde cada una de las series p_s se ha sacado una variable continente la terna RGB promedio, llamada M1roimedia,...,M8roimedia. Por lo tanto, con estas elaboraciones se han conseguido las siguientes variables:

- 1) c, r: 2 variables relativas a las coordenadas espaciales de los 25 píxeles de la serie p_s , donde $c=x$ y $r=y$;
- 2) M1roi,...,M8roi: variables que contienen las 25 ternas RGB de los 25 píxeles de la serie p_s ;
- 3) M1roimedia,...,M8roimedia: variables con el promedio de los valores RGB de las 25 ternas de la serie p_s ;
- 4) Mroimedia: variable que contiene las 8 ternas RGB M1roimedia,...,M8roimedia. Útil también para elaboraciones en entorno Excel.

Todas estas variables han sido guardadas en un conjunto llamado 'RGBseriepíxel'. Los números RGB obtenidos son los siguientes:

	Muestra1			Muestra2			Muestra3		
Parche	R	G	B	R	G	B	R	G	B
1	122,8	112,96	63,32	122,16	112,16	62,32	125,48	115,92	66,08
2	136,32	127,96	74,16	138,8	130,36	77,16	137,24	128,88	75,88
3	145,6	137,88	85,08	145,76	137,76	84,52	143,04	135,6	81,88
4	148,32	140,56	88,92	148,48	140,52	88,8	149,16	141,6	90,2
5	151,88	144,88	94,8	149,16	141,76	91,44	144,68	136,72	85,16
6	151,12	143,84	93,56	151,68	144,92	95,16	151,04	144,24	94,24
7	149,72	143,44	95,56	149,24	143,2	95,44	150,08	144,24	96,72
8	164,36	159,56	116,68	163,92	159,28	115,48	163,76	159,6	116
	Muestra4			Muestra5			PROMEDIO		
Parche	R	G	B	R	G	B	R	G	B
1	123,88	114,68	64,92	123,92	114,44	64,92	123,648	114,168	64,312
2	130,12	121,24	67,16	129,36	120,64	66,72	134,368	125,816	72,216
3	144,84	137,24	84,08	144,84	137,08	84,48	144,816	137,112	83,992
4	148,08	140,08	88,12	147,96	140,16	88,6	148,4	140,584	88,928
5	150,36	143,96	94,08	150,24	143,6	94,04	149,264	142,184	91,904
6	149,48	142,12	91,16	148,44	141,48	91,16	150,352	143,32	93,056
7	149,92	143,48	95,96	150	143,52	95,68	149,792	143,576	95,872
8	164,56	159,8	116,84	164,4	159,72	116,8	164,2	159,592	116,36

Tabla 6. RGB obtenidos desde el promedio de los píxeles de la región central de las ROI

³¹ Cada ROI mide 250×250 píxeles.

³² En Anexo 1, subpárrafo 3.4, se encuentran las coordenadas x e y de cada píxel elegido.

3.2.3.4.3. Datos RGB elegidos y su interpolación para la obtención de los valores colorimétricos XYZ

El cálculo del coeficiente de correlación comprueba una afinidad elevada (igual a $0,992183^{33}$), entre las dos ternas, pero con el objetivo de poder evaluar todas las posibles variables de color producidas entre una muestra y la otra, se ha elegido utilizar las ternas obtenidas desde el promedio de todos los píxeles.

Utilizando las tablas de calibración colorimétrica creadas por la Nikon D50³⁴, los números digitales RGB han sido transformados por interpolación lineal en valores colorimétricos CIE-XYZ³⁵. En el anexo VI es posible consultar la evaluación entre los dos grupos de valores XYZ obtenidos.

Parche	PROMEDIO TODOS LOS PÍXELES (250X250)			↕ interpolación ↕	XYZ OBTENIDOS POR INTERPOLACIÓN XYZ ESPECTROFOTÓMETRO			XYZ OBTENIDOS POR INTERPOLACIÓN XYZ TELECOLORÍMETRO		
	R	G	B		X	Y	Z	X	Y	Z
1	124,136	114,9639	66,52685	↕ interpolación ↕	16,7252	16,9931	12,8839	16,8355	16,3731	12,5817
2	139,537	131,1877	77,69293		17,7579	17,9786	12,7242	17,8552	17,4305	13,0347
3	144,2872	136,6008	83,88355		18,0764	18,3075	12,6356	18,1697	17,7833	13,4699
4	147,6115	139,3868	87,44869		18,2993	18,4767	12,5846	18,3898	17,9648	13,7206
5	151,653	144,5008	94,18682		18,5703	18,7874	12,6538	18,6574	18,2981	14,1943
6	154,4773	148,2309	99,19626		18,7597	19,0140	13,0540	18,8444	18,5413	14,5465
7	155,714	151,3226	106,9777		18,8426	19,2018	13,6756	18,9263	18,7428	15,0935
8	162,2705	157,4012	113,0384		19,2822	19,5711	14,1598	19,3604	19,1389	15,5196

Tabla 7. Obtención de valores tristímulo mediante interpolación

3.2.3.4.4. Obtención de valores colorimétricos en espacios CIE-Yxy, CIE-Lab y CIE-LCh

Para obtener los valores en los espacios CIE que nos interesan se ha utilizado la aplicación de MATLAB OptProp, la misma utilizada para obtener los valores CIE-XYZ, CIE-Lab y CIE-LCh del telecolorímetro. Todos los valores tristímulo obtenidos se encuentran en Anexo 1, mientras que observaciones, elaboraciones y resultados de las conversiones se encuentran en Anexo 2.

³³ Ver Anexo 1, párrafo 3.6.

³⁴ Ver subpárrafo 3.1.6.2.

³⁵ Por las observaciones, los cálculos y los resultados del proceso de interpolación ver Anexo 5.

3.2.4. EVALUACIÓN DE LOS CAMBIOS COLORIMÉTRICOS CON RELACIÓN A LAS METODOLOGÍAS ADOPTADAS

Para poder llevar a cabo esta simulación de degradación de color en el tiempo, según lo definido en la introducción de este capítulo, es necesario definir arbitrariamente un parámetro de tiempo para cada una de las muestra-color. Por lo tanto, se asume que la muestra 1 representa el color del revoque en su originalidad y que a lo largo de siete meses se ha medido este color cada 30 días para evaluar eventuales cambios colorimétricos de manera que:

muestra 1: medición primer día
muestra 2: medición día 30
muestra 3: medición día 60
muestra 4: medición día 90
muestra 5: medición día 120
muestra 6: medición día 150
muestra 7: medición día 180
muestra 8: medición día 210

Por lo dicho, se ha calculado el ΔE en el espacio CIE-Lab con relación a cada medición simulada. Las evaluaciones y consideraciones finales se han hecho comparando los resultados obtenidos utilizando la fotocámara Nikon D50 con los resultados obtenidos midiendo respectivamente con:

- A) Espectrofotómetro Minolta Cm-2600d
- B) Telecolorímetro Minolta CS-100

Además, para los valores colorimétricos obtenidos utilizando la cámara fotográfica Nikon D50 se han tenido en cuenta dos diferentes procesos de obtención y elaboración de los datos:

- 1) valores XYZ obtenidos desde números RGB utilizando la tabla de calibración en que los valores XYZ son derivados desde medición con espectrofotómetro;
- 2) valores XYZ obtenidos desde números RGB utilizando la tabla de calibración en que los valores XYZ son derivados desde medición con telecolorímetro.

Por lo tanto tenemos diferentes grupos de datos a analizar comparando entre ellos las desviaciones estándares para evaluar la eficacia de una análisis colorimétrica efectuada elaborando imagenes capturadas con cámara digital.

Grupo A – Evaluación de las diferencias entre valores colorimétricos obtenidos con:

- 1) Nikon D50 - proceso de calibración con XYZ espectrofotómetro
- 2) Espectrofotómetro Minolta Cm-2600d
- 3) Telecolorímetro Minolta CS-100

Grupo B - Evaluación de las diferencias entre valores colorimétricos obtenidos con:

- 1) Nikon D50 - proceso de calibración con XYZ telecolorímetro
- 2) Espectrofotómetro Minolta Cm-2600d
- 3) Telecolorímetro Minolta CS-100

3.2.4.1 Grupo A: análisis

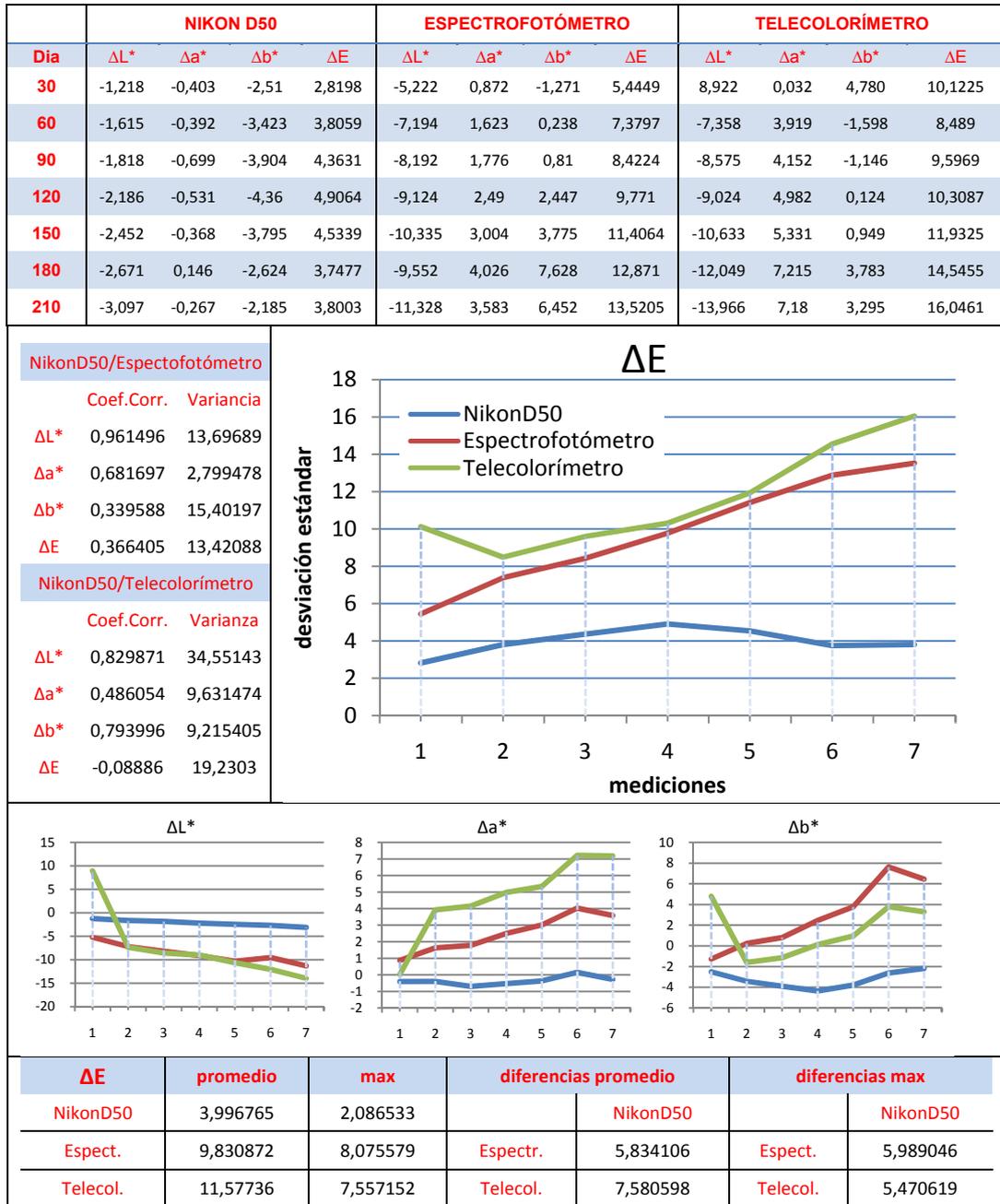


Tabla 8. Gráficos de comparación entre valores CIE-Lab, Grupo A

3.2.4.2 Grupo B: análisis

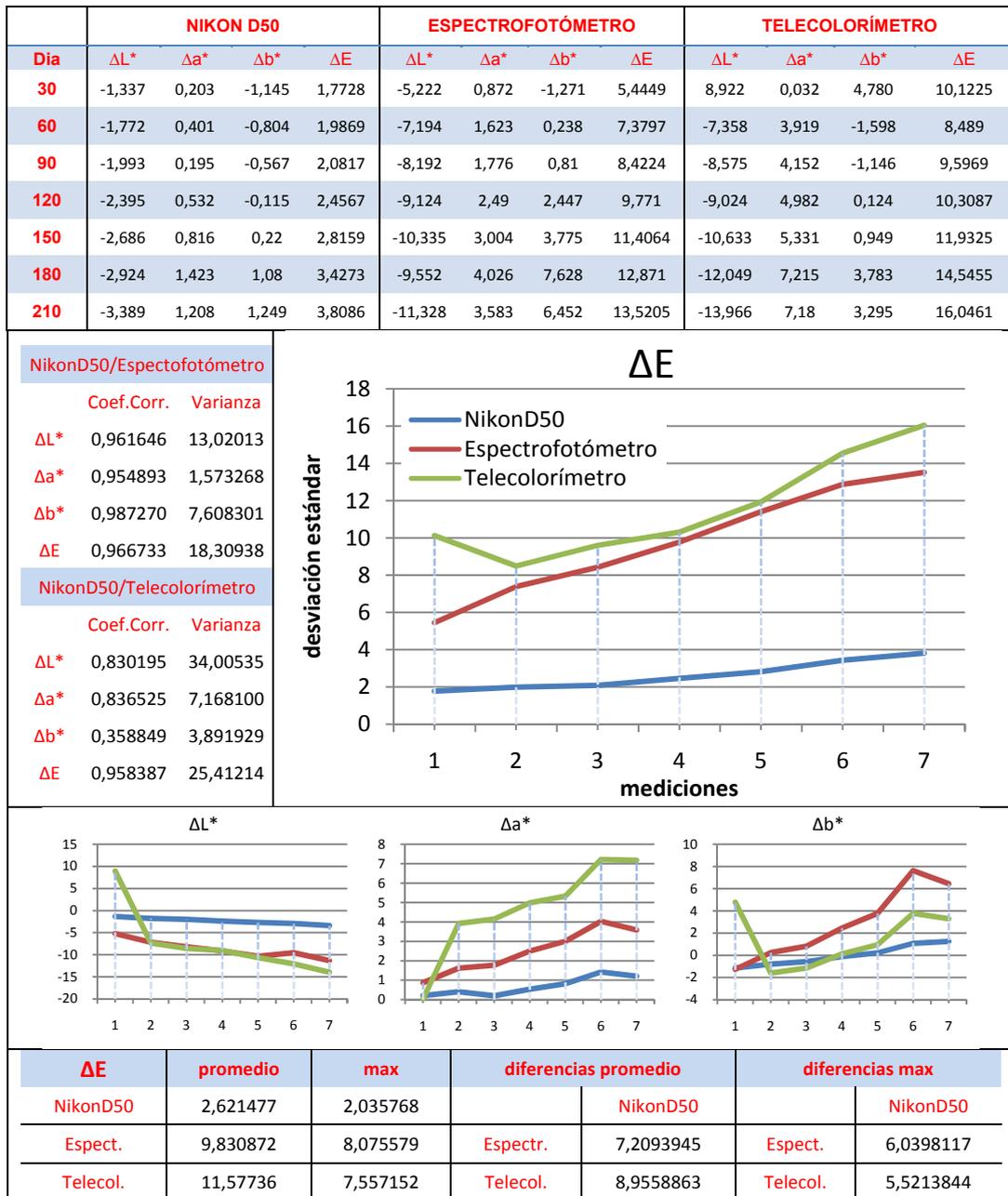


Tabla 9. Gráficos de comparación entre valores CIE-Lab, Grupo B

3.2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En general se observan relaciones más estrechas cuando se utiliza la tabla de calibración colorimétrica en la que los valores XYZ derivan desde medición con telecolorímetro.

Analizando los DeltaE en el Grupo B, es evidente la estrecha correlación entre los valores obtenidos con Nikon D50, tanto con los valores medidos directamente con el telecolorímetro, como con los medidos con el espectrofotómetro. Esta última relación es la que presenta más afinidades también evaluando los niveles de varianza que se producen comparando las

desviaciones estándares. En todo caso, y a pesar de la notable diferencia entre algunos coeficientes de correlación, encontrada por ejemplo con relación al valor b^* , la diferencia de correlación entre NikonD50/Espectrofotómetro y NikonD50/Telecolorímetro en el Grupo B es infinitesimal.

Con relación a las diferencias encontradas en el Grupo A, cabe destacar la muy poca afinidad entre las desviaciones estándares, salvo las encontradas a nivel de L^* , tanto cuando se comparan los valores NikonD50/Telecolorímetro, como cuando se comparan los NikonD50/Espectrofotómetro. En general, las afinidades más estrechas se encuentran en este último caso.

A pesar de la tabla de calibración utilizada para obtener valores triestímulo, cabe destacar que en los valores obtenidos desde la cámara fotográfica en general se observa un nivel de luminosidad más bajo con relación a lo del espectrofotómetro y del telecolorímetro.

Sin embargo, observando los gráficos relativos al DeltaE, lo que interesa es averiguar si hay relación entre las diferentes líneas de tendencia de los cambios de color simulados. En el Grupo B, en general se puede observar que para cada medición hecha con la cámara fotográfica hay un aumento del valor. En el Grupo A, hay un el aumento de valor hasta la medición 4. En las mediciones 5 y 6, en cambio, hay una disminución de valores, para luego volver a aumentar en la última medición (7).

En la línea de tendencia del DeltaE de los valores medidos con espectrofotómetro se encuentra un aumento constante.

En la línea de tendencia del DeltaE de los valores medidos con telecolorímetro, en cambio, hay una disminución bastante evidente en la segunda medición.

4. CONCLUSIONES

4.1 OBJETIVOS CONSEGUIDOS

Siendo el objetivo principal de este trabajo “el evaluar las ventajas que podría ofrecer la utilización de la fotografía digital (y el procesado sus imágenes), en el campo del análisis colorimétrico aplicado a la Conservación y Restauración de Bienes Culturales”, se ha observado que la fase preliminar de calibración es efectivamente fundamental para obtener datos numéricos fiables y, sobre todo, convertibles en valores colorimétricos estandarizados.

Desde el punto de vista instrumental, se ha aclarado que no es necesaria la utilización de una fotocámara digital específica, siempre que esta disponga de archivos de tipo RAW, cuya utilización nos permite una puesta a punto de parámetros en fase de procesado de las imágenes. Se trata de características que en futuro podrían facilitar mucho la realización de aparatos fotográficos digitales dedicados al análisis colorimétrico.

Cuando se ha procedido a la medición con telecolorímetro, se han encontrado algunas dificultades relativas al patrón de calibración, tanto desde el punto de vista de la homogeneidad e intensidad de la iluminación para cada uno de los 24 parches coloreados, como desde el punto de vista de la precisión con respecto al área de medición. En el primer caso, se ha elegido medir intensidad y homogeneidad de iluminación cada vez que ha sido necesario desplazar el ColorChecker X-Rite, y se ha concluido que sería interesante poner a punto, para futuras calibraciones, un sistema de desplazamiento mecánico muy sencillo y que no atañe el patrón de calibración, sino directamente el eje del banco óptico dónde se aloja el telecolorímetro. Y en el segundo se ha realizado un sistema sencillo que, a través la utilización de papeles de acetato y previo dibujo de coordenadas geométricas, ha permitido la localización cierta del área de medición para cada parche. Este recurso, ya utilizado en las mediciones con espectrofotómetro, permite una fiable repetibilidad de las mediciones.

Prescindiendo del nivel optimal de homogeneidad y difusión de iluminación alcanzados, resulta claramente que los valores tristímulo obtenidos por interpolación y transformación de los números RGB de la cámara fotográfica calibrada tienen niveles más altos de luminosidad, tanto en el espacio color CIE-Yyz como en el espacio color CIE-Lab. Con mucha probabilidad esta diferencia es debida a la sensibilidad propia del sensor de captura de la cámara fotográfica utilizada, como también puede confirmar la estrecha relación entre los valores de luminosidad encontrada entre valores medidos con el espectrofotómetro y con el telecolorímetro.

Por lo tanto, en la realización y evaluación de una tabla de conversión entre números RGB y valores XYZ, ha sido necesario valerse de índices matemáticos para establecer relaciones optimas entre los datos obtenidos. Puesto que no hay coincidencia exacta entre canales digitales y estímulos colorimétricos se cree que el cálculo estadístico de las relaciones RGB/XYZ con relación a la instrumentación utilizada puede representar, también para el futuro, una ayuda útil para determinar una calibración correcta.

Siguiendo con el tema de la iluminación, cabe destacar que la utilización de programas informáticos para convertir los archivos gruesos (RAW) en archivos leíbles tiene que ser adecuada. Los parámetros de conversión del RAW tienen que ser elegidos con atención para evitar la involuntaria generación de factores de alteración de los datos digitales que componen las imágenes. Por lo tanto, para que los datos que componen al archivo grueso resulten lo más afines posible a los datos engendrados por los instrumentos específicos de Colorimetría, hace falta poner atención al tipo de perfil que se asigna a dicho archivo grueso en fase de conversión.

Elaborando el perfil que asignar a las imágenes se ha elegido como fuente de iluminación bombillas D_{65} (6.504°K), coherentemente con la fuente de iluminación externa y con la fuente de iluminación propia del espectrofotómetro. No obstante, el software de conversión de la CameraRaw ha revelado en cada imagen fotográfica una temperatura de iluminación inferior (5350° K), debida, casi con certeza, a la calidad misma de las bombillas D_{65} utilizadas, ya que, como se ha dicho, homogeneidad y difusión de la luz han estado sometidas a rigurosos

controles en todas las fases de medición. Sin embargo, los elevados coeficientes de relación obtenidos entre los valores colorimétricos finales, en fase de calibración con ColorChecker X-Rite demuestra que el cambio arbitrario del parámetro de iluminación para crear un perfil de conversión entre RAW y archivo .tiff ha sido una elección eficaz. Demuestra de nuevo, además, la importancia de todo el procesado informático. Para calibraciones y mediciones futuras es aconsejable un control más estrecho de la calidad de las fuentes de iluminación y comparaciones entre valores derivados desde diferentes perfiles de conversión de las imágenes RAW.

Por lo que concierne a la comparación entre las diferentes instrumentaciones colorimétricas utilizadas, ya se ha explicado que, en general, los valores obtenidos son muy similares entre ellos. Aunque el empleo del espectrofotómetro parece el más adecuado, riguroso y fiable, dado que el objetivo de esta investigación no era obtener valores triestímulo a partir de una cámara fotográfica idénticos a los valores engendrados por un espectrofotómetro, sino comparables, en términos de evaluación del porcentaje de los cambios colorimétricos experimentados entre mediciones, se ha valorado positivamente que es posible establecer, utilizando una fotocámara digital rigurosamente calibrada, en qué porcentaje un color puede cambiar en el tiempo y si existe alguna relación entre estos cambios y los medidos con instrumentaciones especializadas.

Los excelentes resultados, en términos de coeficientes de correlación entre números digitales RGB convertidos y valores triestímulo originados a partir de instrumentación telecolorimétrica, y desde el punto de vista de la variabilidad (estimación de la varianza) entre los mismos valores, ha aclarado que, efectuando siempre una atenta calibración de la cámara fotográfica, es posible proceder a mediciones colorimétricas, siempre que el objetivo sea comparar datos relativos a cambios de color experimentados por una superficie coloreada causados por problemas de conservación y restauración. Además, cuando se han encontrados grandes diferencias, como en caso de los valores obtenidos utilizando la tabla de calibración en que los valores XYZ son derivados desde medición con espectrofotómetro, es necesario subrayar que estas se han producido en las muestras que presentaban en sus superficies una evidente heterogeneidad en cuanto a los cambios de color (muestra 5 y 7, respectivamente medición 4 y 6). Es suposible que estas diferencias no sean debidas a errores en fase de captura o en fase de obtención y transformación de los datos RGB, ya que sabemos que el área de medida de la cámara fotográfica es más amplia del área de un instrumento especializado y, por lo tanto, se han capturados mucho más informaciones y mucho más heterogeneas entre ellas. Por lo tanto, es aconsejable que este tipo de análisis colorimétrico alternativo sea evaluado junto a las posibilidades que en la actualidad ofrece el procesamiento de las imágenes digitales. En este sentido, las evaluaciones sobre el análisis de la intensidad de los píxeles hechas en el Anexo VIII representan una primera tentativa.

Discurso a parte merece la elaboración informática de las imágenes. En el curso de este trabajo ya se ha subrayado que para los objetivos propuestos es necesario que la interpretación de una imagen fotográfica vaya más allá de ser un soporte para la visualización de formas y estético. Coloriméricamente las imágenes tienen que ser leídas e interpretadas como un conjunto de números expresados en los canales del rojo, verde y azul y convertibles en valores triestímulo. Esta diferencia de enfoque ha sido fundamental en la tentativa de alcanzar los objetivos y ha permitido una valoración objetiva de los instrumentos informáticos utilizados. Ha sido enseguida evidente que la interpretación matemática de las imágenes digitales con un programa muy difuso como Photoshop CS4 presenta muchas limitaciones debidas a la naturaleza misma del software, que obviamente se vale de parámetros y funciones de elaboración que no pueden ser modelados sobre específicas exigencias. Por ejemplo, los datos RGB de cada píxel que compone una imagen pueden ser convertidos directamente en valores $L^*a^*b^*$ utilizando un simple mando, pero en la realidad esta conversión se basa en parámetros propios de la casa productora del software y no en estándares de conversión establecidos por la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE). Al contrario, Photoshop CS4 se ha mostrado un instrumento necesario en el tratamiento de los datos RAW, empleando su aplicación CamaraRaw.

La utilización de un programa de computación y elaboración como MATLAB, ha sido imprescindible para extrapolar y elaborar los millares de datos numéricos de las imágenes. Píxel tras píxel, ha sido posible averiguar cada terna numérica RGB, mientras que la transformaciones entre espacios de color han sido ejecutadas utilizando *tool* creados de propósito para ejecutar operaciones colorimétricas. A estas ventajas se suma la posibilidad de analizar también el color bajo otros puntos de vista, como se ha demostrado en los Anexos VII y VIII. Por el futuro es aconsejable profundizar las posibles interacciones entre el análisis colorimétrico y los de color efectuable con programas de procesamiento digital.

4.2 PERSPECTIVA FUTURA

Los objetivos alcanzados nos permiten evaluar la posibilidad de continuar en el desarrollo de esta línea de investigación con el propósito de poner a punto una instrumentación capaz de detectar, tanto los valores colorimétricos, como los espectrofotométricos, y que sea, sobre todo, útil para la medición de cambios de color sobre superficies puestas al exterior.

El primer paso será evaluar y experimentar los métodos más actuales y fiables para las estimaciones matemáticas de los espectros de reflectancia utilizando una cámara digital de tipo comercial, o, como alternativa, realizar un instrumento de captura fotográfica digital específico capaz de capturar imágenes multiespectrales, disfrutando de las amplias capacidades técnicas ofrecidas por las estructuras de investigación de la Universidad Politécnica de Valencia.

La segunda fase sería la verdadera realización de un aparato de medición para superficies puestas al exterior. En este sentido cabe destacar que la experiencia adquirida en los últimos años en el Laboratorio de Óptica y Colorimetría del Instituto de Restauración del Patrimonio en el campo de la automatización robótica podría ser muy útil. Efectivamente, el objetivo sería desarrollar una instrumentación totalmente automática capaz de disparar fotografías sobre una superficie utilizando un temporizador y una red inalámbrica, que envíe las informaciones digitales a un servidor dedicado. Todo ello para intentar realizar un instrumento capaz de medir en condiciones no habituales en colorimetría y que sea capaz de utilizar, autónomamente y con elevada precisión, sensores de movimiento y sensores para la detección de la luminosidad.

En la tercera fase se pretende profundizar las posibilidades analíticas que ofrece el procesamiento de imágenes digitales.

Se trata de un trabajo multidisciplinar que ya ha suscitado el interés de estructuras de investigación de la UPV, como el GIFLE, "Grupo de Investigación en Fotogrametría y Láser Escáner" (con experiencias similares en la creación de redes inalámbricas y de servidores dedicados, y pionero en el campo del procesamiento informático de imagen digital), y de Italia, concretamente el Istituto per l'Applicazione del Calcolo del CNR, que ha elaborado y patentado en los últimos años un sistema informático de detección de los cambios colorimétricos para el análisis de imágenes digitales.

BIBLIOGRAFÍA

MONOGRAFÍAS

AA. VV.. *Misurare il colore – fisiologia della visione a colori – fotometria – Colorimetria e norme internazionali*. 2° edición. OLEARI, Claudio (ed.). Milano: Ulrico Hoepli Editore, 2008. ISBN 978-88-203-4126-8

AA. VV.. *Colore e colorimetria: contributi multidisciplinari*. RAGGI, Andrea (ed.). Atti della prima conferenza nazionale del Gruppo di Colore, Università degli Studi "G. d'Annunzio", Pescara 20-21 ottobre 2005. Firenze: Edición Centro Editoriale Toscano, 2005. ISBN 88-7957-243-1

AA. VV.. *Colorimetria e beni culturali*. OLEARI, Claudio (ed.). Acta de los convenios de Firenze 1999 y Venecia 2000. Firenze: Edición Centro Editoriale Toscano, 2000. ISBN 88-7957-160-5

AA. VV.. *Revestimiento y color en la arquitectura. Conservación y Restauración*. Colección Monográfica: ARQUITECTURA. GALLEGO ROCA, Francisco Javier (ed.). Ponencias presentadas en el Curso de Restauración Arquitectónica, Granada 25, 26 y 27 de marzo 1993. Granada: Edición Servicio de Publicaciones de la Universidad de Granada, 1996. ISBN 84-338-2209-8

ALEGRE GUTIÉRREZ, Enrique; SÁNCHEZ GONZÁLEZ, Lidia; FERNÁNDEZ DÍAZ, Ramón Ángel; MOSTAZA ANTOLÍN, Juan Carlos. *Procesamiento digital de imagen: fundamentos y prácticas con Matlab*. León: Edición Universidad de León, 2004. ISBN: 978-84-9773-052-5

ALTHÖFER, Heinz. *La radiologia per il restauro delle opere d'arte moderne e contemporanee*. Firenze: Nardini editore, 1997. ISBN 88-404-4044-5

CIABURRO Giuseppe. *Matlab. Guida all'uso*. Milano: Edizioni FAG, 2007. ISBN 978-88-8233-642-4

DEZZI BARDESCHI, Marco. *Restauro: punto e da capo. Frammenti per una (impossibile) teoria*. Vittorio Locatelli (ed.). Milano: Franco Angeli Editore, 1991. ISBN 88-204-6506-X

ESPUGA BELLAFONT, Jaume; BERASATEGUI BERASATEGUI, Delfina; GIBERT ARMENGOL, Vicenç. *Revoques y estucados. Teoría y práctica*. Barcelona: Edicions Universidad Politecnica de Catalunya, 1999. ISBN 84-8301-284-7

FRASER, Bruce. *Camera Raw con Photoshop CS2*. Madrid: Anaya Multimedia, 2006. ISBN 84-4151-973-0

GARCÍA, Ángela; LLOPIS, Jorge; V. MASIÁ, José; TORRES, Ana; VILLAPLANA, Ramón. *El color en el barrio de Velleuters*. Valencia: Edición Trasgos, ca. 2000. ISBN 84-607-0306-1

GARCÍA Ángela; LLOPIS, Jorge; V. MASIÁ, José; TORRES, Ana; VILLAPLANA, Ramón. *El color del centro histórico. Arquitectura en el Barrio del Carmen de Valencia*. Valencia: Edición Trasgos, ca.1995. ISBN 84-605-2163-X

GASPAROLI, Paolo. *La conservazione dei dipinti murali. Affreschi, dipinti a secco, graffiti*. Firenze: Alinea editrice, 1999. ISBN 88-8125-306-2

GONZALEZ, Rafael C.; WOODS, Richard E.; EDDINS, Steven L. *Digital image processing using Matlab*. New Jersey (USA): Pearson Education Inc., 2004. ISBN 0-13-008519-17

HORIE, C.V. *Materials for conservation. Organic consolidants, adhesive and coating*. 3° edición 1987. Oxford: Ed. Butterworth-Heinemann, 1999. ISBN 0-7506-0881-1

MACARRÓN MIGUEL Ana María; GONZÁLEZ MOZO, Ana. *La conservación y la restauración en el siglo XX*. Madrid: Editorial Tecnos S.A., 1998. ISBN 84-309-3165-1

MAIO, Giuseppe. *Reflex. Manuale di fotografia digitale*. Milano: Editrice Progresso, 2006. ISBN 88-89514-02-7

NYSTRÖM, Daniel. *Colorimetric and Multispectral Image Acquisition*. Linköping (Suecia): edición LIU-Tryck, 2006. ISBN 91-85643-11-4.

PALAZZI, Sergio. *Colorimetria. La scienza del colore nell'arte e nella tecnica*. Firenze: Nardini editore, 1995. ISBN 88-404-4040-2

PARTE DE MONOGRAFÍAS

BATTAGLINO, Sabina; OLEARI, Claudio. "Appendice 1. Strumenti matematici della colorimetria". En: AA. VV.. *Misurare il colore – fisiologia della visione a colori – fotometria – Colorimetria e norme internazionali*. OLEARI, Claudio (ed.), 2° edición. Milano: Ulrico Hoepli Editore, 2008, pp. 369-388. ISBN 978-88-203-4126-8.

GERBINO, Walter. "Percezione del colore". En: AA. VV.. *Misurare il colore – fisiologia della visione a colori – fotometria – Colorimetria e norme internazionali*. OLEARI, Claudio (ed.), 2° edición. Milano: Ulrico Hoepli Editore, 2008, pp. 112-130. ISBN 978-88-203-4126-8.

OLEARI, Claudio. "Colorimetria". En: AA. VV.. *Misurare il colore – fisiologia della visione a colori – fotometria – Colorimetria e norme internazionali*. OLEARI, Claudio (ed.), 2° edición. Milano: Ulrico Hoepli Editore, 2008, pp. 139-245. ISBN 978-88-203-4126-8.

PUBLICACIONES EN SERIE

Journal of Imaging Science and Technology. Edición IS&T. Vol. 44, nº4. Springfield (USA): 2000. ISSN 1062-3701.

Journal of Imaging Science and Technology. Edición IS&T. Vol. 47, nº4. Springfield (USA): 2003. ISSN 1062-3701.

Journal of Imaging Science and Technology. Edición IS&T. Vol. 53, nº2. Springfield (USA): 2009. ISSN 1062-3701.

Journal of the Optical Society of America. Edición Optical Society of America (OSA). Vol. 25. USA: 2008. ISSN (printed): 1084-7529. ISSN (electronic): 1520-8532.

Color Research Application. Edición John Wiley & Sons, Inc. Vol. 32, nº5. USA: 2007. ISSN (printed): 0361-2317. ISSN (electronic): 1520-6378.

ARTÍCULOS DE PUBLICACIONES EN SERIE

IMAI, F.H.; BERNS, R. S.; Tzeng, D. "A comparative analysis of spectral reflectance estimation in various spaces using a trichromatic camera system". En: *Journal of Imaging Science and Technology*. Edición IS&T, 2000, vol. 44, nº4, pp. 280-287. ISSN 1062-3701

KEE-HYON, Park; DAE-GEUN, Park; YEONG-HO, Ha. "High Dynamic Range Image Acquisition from Multiple Low Dynamic Range Images Based on Estimation of Scene Dynamic Range". En: *Journal of Imaging Science and Technology*. Edición IS&T, 2009, vol. 53, nº2, pp. 1-12. ISSN 1062-3701.

MARTÍNEZ-VERDÚ, F.; PUJOL, J; CAPILLA, P. "Characterization of a Digital Camera as an Absolute Tristimulus Colorimeter". En: *Journal of Imaging Science and Technology*. Edición IS&T, 2000, vol. 47, nº4, pp. 279-295. ISSN 1062-3701.

MELGOSA, M.; HUERTAS, R.; BERNS, R. S. "Performance of recent advanced color-difference formulae using the Standardized Residual Sum of Squares index". En: *Journal of the Optical Society of America*. Edición Optical Society of America (OSA), 2008, vol. 25, pp. 1828-1834. ISSN (printed): 1084-7529. ISSN (electronic): 1520-8532.

NIEVES, J. L.; VALERO, E.M.; NASCIMENTO, S.M.C.; HERNÁNDEZ-ANDRÉS, J.; ROMERO, J. "Multispectral synthesis of daylight using a commercial digital CCD camera". En: *Applied Optics*. Edición Optical Society of America (OSA), setiembre 2005, vol. 44, nº27, pp. 5696-5703. ISSN (printed): 0003-6935. ISSN (electronic): 1539-4522

SAKURAI, M.; HECKAMAN, R.L.; CASELLA, S.E.; FAIRCHILD, M.D.; NAKATSUE, T.; SHIMPUKU, Y. "Effects of display properties on perceived color-gamut volume and preference".

En: *Journal of the Society of Information Display*. Edición Society of Information Display, 2008, vol. 16, pp. 1203-1211. ISSN: 1071-0922

ZHAO, Y.; BERNS, R. S. "Image-based spectral reflectance reconstruction using the Matrix R method". En: *Color Research Application*. Edición John Wiley & Sons Inc., 2007, vol. 32, n°5, pp. 343-351. ISSN (printed): 0361-2317. ISSN (electronic): 1520-6378.

KEE-HYON, Park; DAE-GEUN, Park; YEONG-HO, Ha. "High Dynamic Range Image Acquisition from Multiple Low Dynamic Range Images Based on Estimation of Scene Dynamic Range". En: *Journal of Imaging Science and Technology*. Edición IS&T, 2009, vol. 53, n°2, pp. 1-12. ISSN 1062-3701.

PONENCIAS DE CONGRESOS

BERNS, R. S.; TAPLIN, L. A.; NEZAMABADI, M.; MOHAMMADI, M.; ZHAO, Y. "Spectral imaging using a commercial color-filter array digital camera". En: *Preprints of Proceeding of The 14th Triennial ICOM-CC meeting*. La Haya (Países Bajos): 2005, pp. 743-750. available on line in <http://art-si.org/>. ISBN 1-873936-92-3

BERNS, R. S.; IMAI, F. H. "The use of multi-channel visible spectrum imaging for pigment identification". En: *Actas del 13th Triennial ICOM-CC meeting*. Rio de Janeiro (Brazil): 2002, pp. 217-222. available on line in <http://art-si.org/>. ISBN 1-902916-30-1

IMAI, F. H.; BERNS, R. S. "Spectral estimation of oil paints using multi-filter trichromatic imaging". En: *Actas del 9th Congress of the International Colour Association*. Rochester (NY, USA), 2001, pp. 504-507. ISBN: 0-89208-235-6

IMAI, F. H.; QUAN, S.; ROSEN, M. R.; BERNS, R. S. "Digital camera filter design for colorimetric and spectral accuracy". En: *Actas del Third International Conference on Multispectral Color Science*. Coordinadores Markku Hauta-Kasari, Jouni Hiltunen and Jarmo Vanhanen. Joensuu (Finland): University of Joensuu, 2001, pp. 13-16. ISBN: 952-458-030-6

MOHAMMADI, M.; BERNS, R.S. "Diagnosing and Correcting Systematic Errors in Spectral Based Digital Imaging". En: *Actas del Thirteenth Color Imaging Conference: Color Science and Engineering, Systems, Technologies and Applications*. Springfield: IS&T, 2005, pp. 25-30. ISBN: 0-89208-259-3

MOHAMMADI, M.; NEZAMABADI, M.; BERNS, R. S.; TAPLIN, L. A. "A Prototype Calibration Target for Spectral Imaging". En: *Actas del 10th Congress of the International Colour Association, Granada, Spain*. Oxford: John Wiley and Sons, 2005, pp. 387-390. ISBN: 84-609-5162-6

SÜSSTRUNK, Sabine; BUCKLEY, Robert; SWEN, Steve. "Standard RGB color spaces", En: *Actas del 7th Color Imaging Conference*, 16-19 noviembre 1999, Scottsdale, Arizona (EE.UU.). Springfield: IS&T/SID, 1999, vol. 7, pp. 127-134. ISBN: 0-89208-224-0

TAPLIN, L. A.; BERNS, R. S. "Practical spectral capture systems for museum imaging". En: *Actas del 10th Congress of the International Colour Association, Granada, Spain*. Oxford: John Wiley and Sons, 2005, pp. 1287-1290. ISBN: 84-609-5162-6

URBAN, P.; ROSEN, M.R.; BERNS, R. S. "Fast Spectral-Based Separation of Multispectral Images". En: *Actas del Fifteenth Color Imaging Conference: Color Science and Engineering, Systems, Technologies and Applications*. Springfield: IS&T, 2007, pp. 178-183. ISBN: 978-0-89208-275-9

ZHAO, Y.; BERNS, R. S.; TAPLIN, L. A.; CODDINGTON, J. "An investigation of multispectral imaging for the mapping of pigments in paintings". En: *Actas del SPIE Conference on Computer Image Analysis in the Study of Art, San Jose (CA, USA)*. Springfield: edición SPIE-IS&T, 2008. ISBN: 9780819469823

ZHAO, Y.; BERNS, R. S.; OKUMURA, Y.; TAPLIN, L. A. "Improvement of Spectral Imaging by Pigment Mapping". En: *Actas del of Thirteenth Color Imaging Conference: Color Science and*

Engineering, Systems, Technologies and Applications. Springfield: IS&T, 2005, pp. 40-45. ISBN: 0-89208-259-3

ZHAO, Y.; TAPLIN, L. A.; NEZAMABADI, M.; BERNIS, R. S. "Using the Matrix R Method for Spectral Image Archives". En: *Actas del 10th Congress of the International Colour Association, Granada, Spain*. Oxford: John Wiley and Sons, 2005, pp. 469-472. ISBN: 84-609-5162-6

MATERIALES DOCENTE DE USO INTERNO

GARCÍA DE JALÓN, Javier; RODRÍGUEZ, José Ignacio; BRAZÁLEZ, Alfonso; FUNES, Patxi; LARZABAL, Alberto. *Aprenda Matlab 5.2 como si estuviera en primero*. Escuela Superior de Ingenieros Industriales/Industri Injineruen Goimailako Eskola, Universidad de Navarra/Nafarroako Unibertsitatea. San Sebastián: sin edición, 1998

MARTÍNEZ BAZÁN, María Luisa. *Colorimetría aplicada al campo de la conservación y restauración*. Departamento de Conservación y Restauración de Bienes Culturales, curso de Máster/Doctorado; ref.: 2008.719. Valencia: Editorial Universidad Politecnica de Valencia, 2008.

NEBOT DÍAZ, Esther. *Técnicas de localización de la información en conservación y restauración (Módulos I y II)*. Departamento de Conservación y Restauración de Bienes Culturales, curso de Máster/Doctorado. Valencia: sin edición, ca. 2008.

NORMAS

COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE (CIE). *Colorimetry – Part 2: CIE Standard Illuminants*. CIE DS 014-2.1. Vienna: 2002.

COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE (CIE). *CIE standard illuminants for colorimetry*. Standard CIE S005/E. Vienna: 1998

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. Ginevra: 1995.