

XLIX Simposium Nacional de Alumbrado

Huesca, 10 al 12 de Mayo del 2023

Ponencia



Título del trabajo/ Title of paper

Caracterización de la reflectancia espectral en tapices históricos

Autor/es/ Author/s

A.López¹, V.García¹, M. Melgosa², S. Mayorga³, A. Álvarez-Balbuena³, K. Okajima⁴, S. Okuda⁵, S. Taguchi⁶, D. Vázquez³.

Empresa/s Company/s

(1) Real Fábrica de Tapices, (2) Universidad de Granada, (3) Universidad Complutense de Madrid, (4) Yokohama National University, (5) Doshisha Women's College of Liberal Arts, (6) Tokyo University of the Arts.

Dirección principal/ Mail address

C/Arcos de Jalón 118

Teléfono, fax, e-mail de la persona de contacto/

Phone, fax number and e-mail address of the contact person

TF:913946880
e-mail: dvazquez@ucm.es

Tema:

2. Luz, salud y bienestar

Con el fin de mantener un misma identidad gráfica en el soporte digital, memoria USB, que se va a editar con motivo del Simposium Nacional de Alumbrado, les rogamos mantengan los márgenes de página, así como los estilos y tamaños de letra que ya vienen preestablecidos en esta plantilla. Así mismo, los datos, la clasificación y el contenido tienen que mantenerse acorde con el abstract aprobado.

Una vez tengan el proyecto finalizado, nos lo deberán enviar por correo electrónico a la dirección cei.secretaria@ceisp.com

Please, write your papers in word format in the attached pattern.

We beg you to follow the format of the papers established in this pattern related to margins, type and size of letters, in order to make a pen drive edition without differences among the papers edited. Likewise, the data, classification and content must be kept in line with the approved abstract.

Once you have written your paper please send it by e-mail to:

cei.secretaria@ceisp.com

Resumen

En este trabajo se presenta medidas de reflectancia espectral y cálculo del color en tapices históricos, a través del uso de un espectroradiómetro 2D y un espectrofotómetro de mano como una forma de caracterizar espectralmente y obtener el color de estos. Se discute la importancia de esta herramienta para la conservación y restauración de estos bienes culturales, y se detallan los pasos necesarios para llevar a cabo una medición precisa y eficiente. Se discuten las posibles aplicaciones de esta técnica en el campo del diseño de iluminación de tapices y la conservación del patrimonio cultural. Asimismo, se aborda la complejidad de la coloración en los tapices y se proponen posibles soluciones para su análisis y preservación a largo plazo. Esta investigación contribuye al campo de la conservación del patrimonio cultural y ofrece nuevas perspectivas para el estudio de las artes textiles. Los resultados demuestran que la medida del color mediante espectroradiómetro 2D y un espectrofotómetro 2D son herramientas valiosas para la caracterización precisa del color en tapices.

Introducción

La conservación y restauración de obras de patrimonio cultural es una tarea crítica para preservar la historia y cultura de la humanidad [1][2]. En particular, los tapices históricos son obras de gran valor artístico y cultural, pero el paso del tiempo y el deterioro natural han afectado su estructura, y, además, debido al deterioro causado por la luz, el color originario de estos tapices se ha degradado y no se puede apreciar en toda su grandeza. Un tapiz es un tipo de tejido en el que los hilos de trama de colores forman un diseño pictórico detallado y también contribuyen a la estructura física del tejido. Los materiales utilizados para la trama suelen ser lana y seda teñidas con una amplia variedad de colores utilizando fuentes naturales. En los tapices más lujosos, también se utilizan hilos metálicos hechos de oro, plata o plata dorada envueltos alrededor de seda [3]. Medir y caracterizar los materiales de los tapices es crucial para evaluar su estado y formular estrategias de tratamiento adecuadas para su conservación.

Existen métodos de medida microdestructivos, como la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), que se han utilizado comúnmente para analizar tintes en textiles, ya que permiten separar y caracterizar los componentes moleculares [4], cuyo inconveniente es la toma de muestras del tapiz. Se han desarrollado técnicas de medida no invasivas para la identificación de materiales de tapices y el análisis de colorantes naturales, como la espectroscopia de reflectancia de fibra óptica (FORS), la espectroscopias infrarroja transformada de Fourier (FTIR), la de superficie de Raman (SERS) [5][6][7]. Las medidas con espectrorradiómetro [8] o colorímetros [9], son una nueva forma de caracterizar los colores del tapiz de forma no invasiva [10], obteniendo

en el primer caso las características espectrales del tapiz para cada punto medido. Una evolución de estos sistemas de medida es el espectrorradiómetro 2D SR-5100 (Topcon Japón), que proporciona en una sola imagen las características espectrales de cada píxel de la zona del tapiz medida con una resolución de 5 megapíxeles (2448 x 2048).

A la hora de recuperar la degradación que tienen los tapices expuestos a agentes físicos, en nuestro país la institución clave en la fabricación y restauración de tejidos es la Real Fábrica de Tapices, líder en su campo [11]. Desde su fundación en 1721 por Felipe V, ha producido tapices y alfombras de alta calidad durante 300 años, llegando a experimentar su máximo esplendor en el siglo XVIII gracias a la promoción de los monarcas borbónicos y la colaboración de pintores como Goya. Su sede histórica fue construida en 1889 y declarada Bien de Interés Cultural en 2006.

En la actualidad, la Real Fábrica de Tapices sigue siendo un referente en la conservación del patrimonio textil y en la promoción de los oficios artísticos vinculados a la fabricación de tapices y alfombras utilizando técnicas e instrumentos históricos. Aunque en el siglo XX se privatizó debido a una menor demanda, en 1996 se transformó en una fundación sin ánimo de lucro para garantizar la transmisión de valores culturales relacionados con el tejido y recuperar su papel como entidad de referencia en la conservación del patrimonio de la Corona.

La Real Fábrica de Tapices (RFT) ofrece servicios de mantenimiento y restauración de alfombras y tapices. La restauración es esencialmente funcional y busca prolongar la vida útil de las piezas, desempeñando históricamente la labor de restaurar tapices y tejidos históricos. En el siglo XX se incrementaron las restauraciones para particulares y se replanteó la metodología. La nueva gestión propone nuevos usos dentro del campo de la divulgación y busca continuar la producción manual mediante la formación de nuevos artesanos e investigación en técnicas de tejido.

La Fundación Real Fábrica de Tapices se compromete con la conservación del patrimonio histórico español y busca restaurar textiles con medios técnicos avanzados. Ofrece visitas guiadas y actividades infantiles para divulgar su legado histórico y cultural. Actualmente imparte un Máster en Conservación y Restauración de Bienes Culturales en Europa y ha conseguido la norma ISO 9001 para ordenar los procesos de restauración.

Considerando la degradación de los materiales orgánicos de los tapices expuestos, esta puede ser causada por reacciones químicas, como fotoquímicas [12], hidrólisis [13] que afecta las cadenas de proteína en condiciones ácidas o básicas, ocasionando pérdida de fortaleza. y entrecruzamientos [14] debido a la unión de varias proteínas produciendo una decadencia de los tejidos, estas reacciones se aceleran si existen, además unas malas condiciones ambientales [15]. Por otra parte, otros factores de degradación son, las fuerzas mecánicas, la humedad, las tensiones, los estiramientos, la temperatura y agentes como las plagas y la contaminación ambiental. [16]. El medio ambiente influye en la degradación de la lana y la seda. La presencia de oxígeno, humedad y contaminantes acelera el deterioro. La lana se deteriora más rápido en condiciones húmedas y ambas fibras son susceptibles al ataque biológico. Los insectos en su estado de larva son un peligro para las fibras animales. Las fibras absorben y expelen humedad dependiendo de la humedad relativa y la temperatura. Esto implica cambios constantes en la forma de la fibra que pueden ocasionar roturas internas. La histéresis se refiere a que cantidad de humedad permanece en la fibra cuando está expeliendo humedad con respecto a cuando está absorbiendo humedad de la misma humedad relativa ambiental.

Este estudio se centra en la degradación producida por la radiación electromagnética, (foto-degradación debida al efecto fotoquímico), que comprende desde el ultravioleta (UV) al infrarrojo cercano, (IR), y las medidas se centraran en zona del espectro visible.

De los materiales usados en la elaboración de los tapices, el más sensible a la radiación UV y a la luz visible es la seda [17], otro material usado cuya sensibilidad es mucho menor. La foto-degradación ocasiona oxidación de los aminoácidos y formación de grupos cromóforos en la seda, esto produce un cambio de color, se vuelve amarilla y a veces con tonos rosas, aumentando la fragilidad, en el mismo caso la lana también pierde fortaleza y sufre amarilleamiento.

La restauración del color de los tapices es un proceso complicado debido a sus características estructurales especiales que son las que definen su técnica: las tramas envuelven por completo a las urdimbres y se van interrumpiendo para cambiar los colores, siguiendo las necesidades del diseño [18]. Los cambios de color generan aberturas que deben ser unidas con otra técnica de costura. Cuando el tapiz cuelga los hilos de urdimbre que están colocados de forma vertical en el telar se convertirán en el elemento estructural del tapiz. Los hilos de trama estarán en contacto directo con las condiciones medioambientales y serán los primeros en sufrir las interacciones con ellas.

Afortunadamente, existen técnicas y sistemas que permiten la restauración y conservación de estas obras de manera segura, reversible y no invasiva. Para solucionar este problema, una solución podría consistir en un sistema de restauración fotónica virtual que realza los colores envejecidos para que visualmente se vean como los originales, aplicados en otros materiales y obras de arte, por ello es necesaria la caracterización del color lo más precisa posible.[19]

Otra intervención fundamental para la conservación de los tapices es la consolidación, la pérdida de tejido debido al deterioro físico es un problema mayor que la pérdida de color, y actualmente se detecta de forma visual demandando una gran atención y especialización del personal encargado.

A la hora de realizar medidas en tapices que hayan sufrido un envejecimiento y pérdida de color es recomendable hacerlas en el anverso y el reverso del tapiz, ya que en el anverso se obtiene una información muy valiosa por no estar tan expuesto a los agentes que producen deterioro, y en el particular que ocupa este estudio, el color permanece. Como ejemplos, en la figura 1(a) izquierda, se muestra la imagen del anverso de un fragmento del tapiz de Mercurio y Cecrops, y 1(b) la imagen del reverso del mismo fragmento se puede observar a simple vista la pérdida de color del tapiz.



Figura 1 (a) en la izquierda, se muestra la imagen de un fragmento del anverso del tapiz de Mercurio y Cecrops (b) en la derecha, imagen del reverso del mismo fragmento del tapiz.

En la figura 2 (a) arriba se muestra el anverso del tapiz Mercurio y Herse y en la figura 2 (b) se muestra el reverso del mismo tapiz, como ocurre en el anterior ejemplo se aprecia a simple vista la pérdida de color.



Figura 2 (a) arriba imagen del anverso del tapiz Mercurio y Herse. (b) abajo el reverso del mismo tapiz.

Para conocer con precisión el estado de conservación de un tapiz se hace necesario la caracterización mediante sistemas de alta resolución espacial y espectral dado que se precisa realizar análisis locales muy detallados y conocer la reflectancia espectral con precisión ya que las pérdidas de reflectancia en determinadas bandas espectrales pueden ser un síntoma de deterioro del tapiz.

En este trabajo se ha realizado la medición de la reflectancia espectral mediante el espectroradiómetro 2D R-5100 (Topcon Japón) con una alta resolución de 5 megapíxeles (2448 x 2048), que es una resolución suficiente para que una persona con agudeza visual normal a la distancia de observación de la obra no pueda apreciar el

mínimo detalle resuelto. Para obtener una forma de comparar los resultados obtenidos, también se aportan medidas espectrales y de color realizadas con un espectrofotómetro.

Esta labor se llevará a cabo tanto en el anverso como en el reverso de la obra, ya que, en los tapices, a diferencia de las pinturas, usualmente el reverso de estos se conserva en buenas condiciones y sirve como referencia fidedigna del estado original del mismo. Los resultados demuestran que el sistema propuesto es capaz de acercarse al color original del tapiz en todo su esplendor y facilitar la interpretación en los procesos de restauración.

Materiales y métodos

Se han realizado medidas sin contacto mediante el espectrorradiómetro SR-5100 (Topcon Japón) con una alta resolución de 5 megapíxeles (2448 x 2048), sobre un tapiz de gran formato proporcionado por la RFT, el cual se dispuso colgado en la pared del taller de la RFT. Al objeto de descontar la distribución espectral de la luz que lo iluminaba se midió con un espectrofotómetro de mano en diversos puntos del mismo, obteniendo de esta forma la distribución espectral del blanco de referencia., con dos iluminantes de referencia, una fuente de luz con características espectrales similares al iluminante A, y otra fuente de luz blanca a 4000 K (Figura 3).



Figura 3. Montaje de medida con el espectrorradiómetro 2D R-510 de un tapiz de gran formato.

Mediante estas medidas se han obtenido las características espectrales del tapiz para cada píxel de la imagen. Esta es su principal diferencia con respecto a los espectrorradiómetros convencionales, debido a que estos solo ofrecen las características

espectrales del punto medido, mientras SR-5100 capta los espectros de la imagen en todo el eje x e y, dividiendo la imagen en píxeles formando una matriz de valores, para cada píxel (x_1, y_1) corresponde un espectro que contiene los valores de reflectancia del píxel $R(\lambda)_{x_1, y_1}$ y el espectro del iluminante utilizado $E(\lambda)$ (estándar A o luz blanca 4000K), la distribución espectral medida del espectrorradiómetro $S(\lambda)$ para el píxel será,

$$S(\lambda)_{x_1, y_1} = R(\lambda)_{x_1, y_1} E(\lambda)$$

Estas medidas han servido para caracterizar el color, para ello se han obtenido los valores XYZ, mediante el concepto de observador estándar desarrollado por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) en 1931 [20], [21] para proporcionar una base para la medición cuantitativa del color. El observador estándar representa una función de igualación de color promedio para un gran número de observadores humanos. Estas funciones de igualación de color se utilizan para calcular los valores triestímulo XYZ, que son coordenadas numéricas que describen el color en un espacio tridimensional.

Los valores triestímulo XYZ se calculan a partir de las funciones de igualación de color del observador estándar y las mediciones espectrales del estímulo de color. El valor X representa la cantidad de luz roja en el estímulo, el valor Y representa la cantidad de luz verde y el valor Z representa la cantidad de luz azul. Estos valores se utilizan para calcular otras coordenadas de color en diferentes espacios de color, como el espacio de color CIELAB.

En resumen, el observador estándar es un modelo matemático que representa la respuesta promedio del ojo humano al color y se utiliza para calcular los valores triestímulo XYZ, que son coordenadas numéricas que describen el color en un espacio tridimensional a diferencia que RGB que es un espacio de color aditivo utilizado principalmente en dispositivos electrónicos como monitores de computadora y televisores. Los colores se crean mediante la combinación de diferentes cantidades de luz roja, verde y azul.

Si tenemos los valores espectrales de la medida de un punto medidos con el espectrorradiómetro, podemos calcular los valores triestímulo XYZ utilizando las funciones de igualación de color del observador estándar de la CIE y la siguiente fórmula:

$$X = k * \int E(\lambda) * \bar{x}(\lambda) * R(\lambda) d\lambda$$
$$Y = k * \int E(\lambda) * \bar{y}(\lambda) * R(\lambda) d\lambda$$
$$Z = k * \int E(\lambda) * \bar{z}(\lambda) * R(\lambda) d\lambda$$

Donde:

- $E(\lambda)$, es la distribución espectral de la fuente de luz.
- $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ y $\bar{z}(\lambda)$, son las funciones de igualación de color del observador estándar de la CIE para las longitudes de onda correspondientes.
- $R(\lambda)$, es la reflectancia espectral del objeto medido.
- k , es un factor de normalización que se calcula como, $k = 100 / \int E(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$.

Estas integrales se pueden aproximar mediante una suma discreta si se tienen mediciones espectrales en intervalos regulares de longitud de onda.

Además, se han realizado dos medidas del tapiz Salve Regina, con un espectrofotómetro con contacto, para tener datos de color de puntos concretos donde se han realizado restauraciones del color. El iluminante que usa este elemento es un iluminante estándar D65.

Resultados

Medidas espectrorradiómetro.

El conocimiento punto a punto de la reflectancia espectral de un tapiz puede permitir, además de conocer el estado de conservación y evolución del mismo, estimar las coordenadas cromáticas que tendrá dicho tapiz al iluminarse con diferentes iluminantes y el daño que estos mismos producirán en cada zona del mismo. Esto puede permitir la elección adecuada y precisa de la correcta fuente de iluminación a emplearse en la exhibición de los tapices.

La Figura 4 muestra los colores simulados, obtenidos de los valores espectrales medidos y convertidos a valores XYZ y representados en la figura, de un gran tapiz en Real Fábrica de Tapices (Madrid España) bajo una luz blanca 4000K.



Figura 4 Tapiz bajo una fuente luz tipo cuerpo negro a 4000K

La Figura 5 muestra los colores simulados obtenidos de los valores triestímulo, bajo una fuente similar espectralmente al estándar A.



Figura 5 Tapiz bajo fuente similar espectralmente al estándar A

De esta manera es posible crear con precisión el aspecto del color bajo iluminación arbitraria. Además, los datos de reflectancia espectral son útiles para el análisis material. En la figura 6, arriba izquierda se muestra la zona del tapiz donde se han tomado dos puntos de la medida, en figura 6 (abajo) se muestra la reflectancia de estos puntos. En la figura 6 a la derecha se muestran las gráficas de la radiancia espectral del píxel #2 considerando el iluminante A $L(\lambda)_{x_2y_2iluminanteA}$ y la fuente de luz blanca a 4000K $L(\lambda)_{x_2y_2luz\ blanca}$.

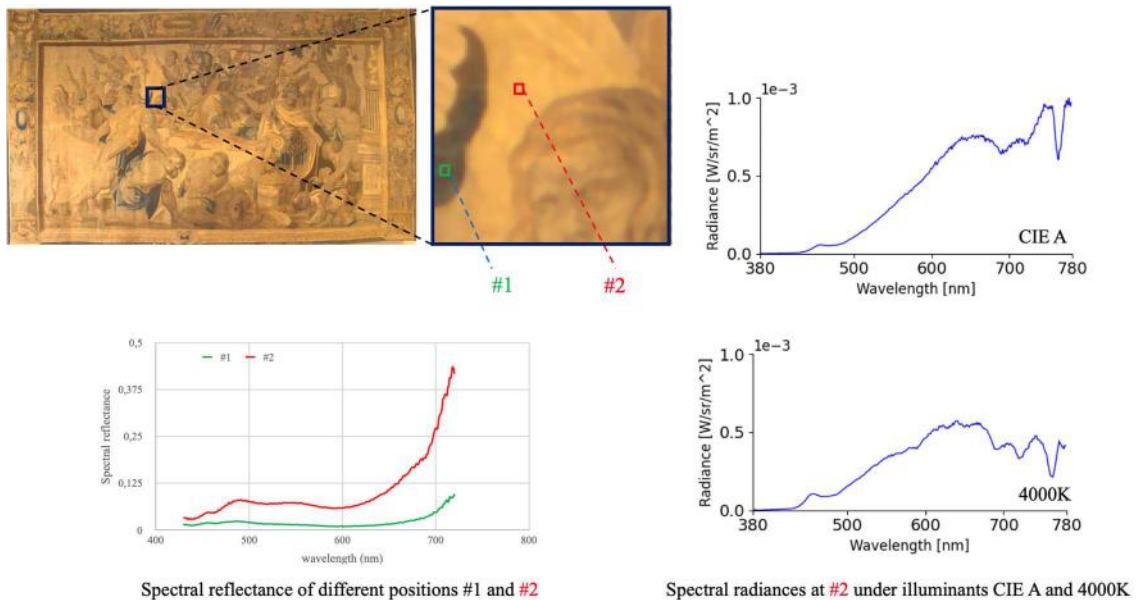


Figura 6. (arriba) imagen y detalle del tapiz de dos píxeles como ejemplo del resultado de medir con el espectrorradiómetro 2D R-5100 (Topcon Japón). (abajo) Reflectancia espectral de los píxeles ejemplo $R(\lambda)_{x_1y_1}$ $R(\lambda)_{x_2y_2}$. (derecha) representa la radiancia espectral en del píxel #2 considerando el iluminante A $L(\lambda)_{x_2y_2iluminanteA}$ y la fuente de luz blanca a 4000K $L(\lambda)_{x_2y_2luz\ blanca}$ (L en $W/sr/m^2$)

Medidas espectrofotómetro manual

Empleando un espectrofotómetro portátil X-Rite Ci-62, se realizaron dos medidas diferentes en el tapiz Salve Regina. La primera en una zona del manto (Figura 7) y la



segunda en la pierna del niño (Figura 9).

Figura 7. Imagen de la zona medida en el tapiz de Salve Regina, con el espectrofotómetro de contacto. El punto amarillo indica la zona donde se realizó la medida.

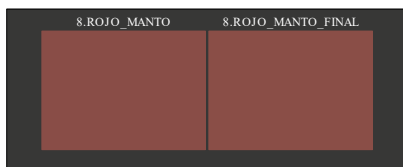
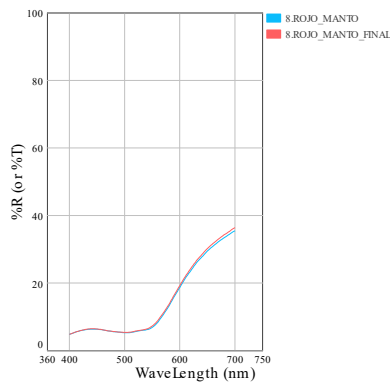
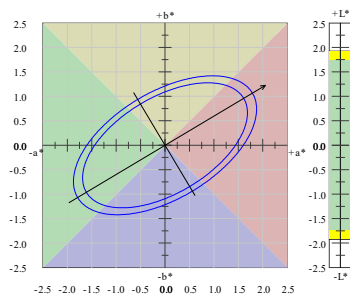
QC

04/05/2022 12:12:47

Customer Name

TAPIZ SALVE REGINA 2 [base de datos=SEDA AZUL.mdb]

dCIE Lab: D65-10



Tolerancias:	$\frac{DL^*}{tol}$	$\frac{Da^*}{tol}$	$\frac{Db^*}{tol}$	$\frac{DC^*}{tol}$	$\frac{DH^*}{tol}$	P/F tol	Margin	l:c
D65-10 [A*10, P02-10 (CWF)]	1.67	1.52	1.24	1.81	0.95	1.00	0.10	2.00
Nombre de estándar	L*	a*	b*	C*	h°			
8.ROJO_MANTO	38.80	26.58	15.87	30.96	30.84			
Nombre muestra	$\frac{DL^*}{L}$	$\frac{Da^*}{R}$	$\frac{Db^*}{Y}$	$\frac{DC^*}{B}$	$\frac{DH^*}{Y}$	$\frac{DEcmc}{0.68}$		
8.ROJO_MANTO_FINAL	0.58	0.06	0.75	0.45	0.61	0.68		

Figura 8. Estudio del color obtenido con el espectrofotómetro de contacto en el punto donde se realizó una restauración de color, con dos medidas, antes de la actuación y la posterior. El punto verde del diagrama dCieLab indica el desplazamiento cromático que ha habido en el proceso de restauración. En la gráfica se representan los espectros de color de las dos medidas, antes y después de restaurar.



Figura 9. Imagen de la zona medida en el tapiz de Salve Regina, con el espectrofotómetro de contacto. El punto rojo en la pierna indica la zona donde se realizó la medida.

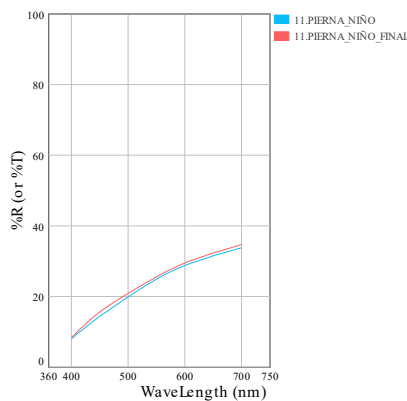
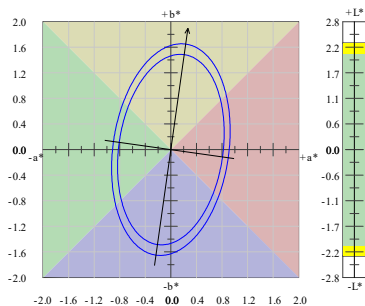
QC

04/05/2022 12:15:58

Customer Name

TAPIZ_SALVE REGINA_2 [base de datos=SEDA_AZUL.mdb]

dCIELab: D65-10



Tolerancias:	DL* to1	Da* to1	Db* to1	DC* to1	DH* to1	P/F to1	Margin	l:c
D65-10 [A-10, F02-10 (CWF)]	2.06	0.86	1.41	1.47	0.80	1.00	0.10	2.00
Nombre de estándar:	L*	a*	b*	C*	h°			
11.PIERNA_NIÑO	56.69	2.82	19.98	20.18	81.98			
Nombre muestra	DL*	Da*	Db*	DC*	DH*	DEcme		
11.PIERNA_NIÑO_FINAL	0.75 L	-0.00	-1.34 B	-1.32 D	-0.19 R	0.89		

Figura 10. Estudio del color obtenido con el espectrofotómetro de contacto en el punto donde se realizó una restauración de color, con dos medidas, antes de la actuación y la posterior. El punto verde del diagrama dCieLab indica el desplazamiento cromático que ha habido en el proceso de restauración. En la gráfica se representan los espectros de color de las dos medidas, antes y después de restaurar.

Conclusiones

La medida precisa y adecuada de la reflectancia espectral de tapices históricos es una herramienta muy útil tanto para la adecuada conservación de los mismos como para la correcta exhibición.

La reflectancia espectral es una fuente de información precisa para evaluar los posibles cambios de los materiales que componen los tapices. Dado que estos tienden a adquirir tonalidades parduzcas y pérdidas de croma en los tejidos que componen la trama de los mismos, es muy interesante para los restauradores, disponer de un sistema que permite establecer esos cambios antes de que sean percibidos como alteraciones cromáticas de importancia.

La medida de esta reflectancia espectral con precisión espacial además de con rigor espectral permite facilitar la evaluación del estado de conservación de los tejidos. Esta tarea puede ser realizada con equipos como el usado en este trabajo, tal y como es el espectroradiómetro 2D R-5100. La forma de medida expuesta hace posible la caracterización de la totalidad del tapiz sin tener que localizar manualmente el espectroradiómetro sobre la zona a medir, lo cual dificulta enormemente la tarea, pudiéndose hacer con el tapiz colgado en su posición original. Obviamente esto es una importante ventaja que ahorra mucho tiempo y trabajo a los equipos de restauración.

Por otro lado, la obtención de medidas de reflectancia espectral hace posible el cálculo de las coordenadas colorimétricas al ser iluminado el tapiz por diversos iluminantes y facilita la decisión sobre la conveniencia de su empleo. El cálculo del factor de daño punto a punto también se hace posible gracias a ese tipo de información.

Referencias

- [1] S. Michalski, "The power of history in the analysis of collection risks from climate fluctuations and light," *ICOM-CC 17th Trienn. Conf. 2014 Melbourne, Prev. Conserv.*, p. 8, 2014.
- [2] A. Tilche, *Environmental technologies and pollution prevention*. 2006.
- [3] C. Vlachou-mogire, J. Danskin, J. R. Gilchrist, and K. Hallett, "Mapping Materials and Dyes on Historic Tapestries Using Hyperspectral Imaging," pp. 3159–3182, 2023.
- [4] I. Degano, E. Ribechini, F. Modugno, and M. P. Colombini, "Analytical Methods for the Characterization of Organic Dyes in Artworks and in Historical Textiles," *Appl. Spectrosc. Rev.*, vol. 44, no. 5, pp. 363–410, Jul. 2009, doi: 10.1080/05704920902937876.
- [5] M. Bacci, A. Casini, C. Cucci, M. Picollo, B. Radicati, and M. Vervat, "Non-invasive spectroscopic measurements on the *Il ritratto della figliastra* by Giovanni Fattori: Identification of pigments and colourimetric analysis," *J. Cult. Herit.*, vol. 4, no. 4, pp. 329–336, 2003, doi: 10.1016/j.culher.2003.09.003.
- [6] E. Ghelardi *et al.*, "A multi-analytical study on the photochemical degradation of

- synthetic organic pigments,” *Dye. Pigment.*, vol. 123, pp. 396–403, 2015, doi: 10.1016/j.dyepig.2015.07.029.
- [7] G. A. P. Samanali, I. Paasi, B. J. Lowe, C. A. Smith, S. J. Fraser-Miller, and K. C. Gordon, “Understanding consolidants on harakeke fibres using Raman microscopy: Implications for conservation,” *J. Cult. Herit.*, vol. 45, pp. 41–47, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.culher.2020.03.005.
- [8] W. Schneider and R. Young, “Spectroradiometry methods,” *Tech. Note*, vol. 06, no. February, pp. 3–46, 2014.
- [9] J. Becerra, A. P. Zaderenko, and P. Ortiz, “Basic Protocol for On-Site Testing Consolidant Nanoparticles on Stone Cultural Heritage,” *Heritage*, vol. 2, no. 4, pp. 2712–2724, Oct. 2019, doi: 10.3390/heritage2040168.
- [10] H. Liu, M. Huang, G. Cui, M. R. Luo, and M. Melgosa, “Color-difference evaluation for digital images using a categorical judgment method,” *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 30, no. 4, p. 616, 2013, doi: 10.1364/josaa.30.000616.
- [11] Real Fabrica de Tapices, “www.realfabricadetapices.com.” <https://www.realfabricadetapices.com/>.
- [12] H.-W. Luo, C.-J. Chou, H.-S. Chen, and M. Luo, “Museum lighting with LEDs: Evaluation of lighting damage to contemporary photographic materials,” *Light. Res. Technol.*, vol. 51, no. 3, pp. 417–431, May 2019, doi: 10.1177/1477153518764538.
- [13] R. L. Feller, D. Eric, and P. C. A., *Research in Conservation. Accelerated Aging*, no. 2. 2010.
- [14] B. Arora, R. Tandon, P. Attri, and R. Bhatia, “Chemical Crosslinking: Role in Protein and Peptide Science,” *Curr. Protein Pept. Sci.*, vol. 18, no. 9, Jul. 2017, doi: 10.2174/1389203717666160724202806.
- [15] H. La Codre *et al.*, “Non-invasive characterization of yellow dyes in tapestries of the 18th century: Influence of composition on degradation,” *Color Res. Appl.*, vol. 46, no. 3, pp. 613–622, Jun. 2021, doi: 10.1002/col.22646.
- [16] R. Costantini, F. Lennard, J. Alsayednoor, and P. Harrison, “Investigating mechanical damage mechanisms of tapestries displayed at different angles using 2D DIC,” *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 135, no. 6, pp. 1–17, 2020, doi: 10.1140/epjp/s13360-020-00520-7.
- [17] INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION, CIE International Commission on Illumination, C. I. E. 157:2004 Technical-Report, INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION, and CIE International Commission on Illumination, “CIE 157-2004 CONTROL OF DAMAGE TO MUSEUM OBJECTS BY OPTICAL RADIATION,” 2004.
- [18] M. López Rey, “Aproximación a la conservación-restauración de los tapices,” *Pecia Complut. Boletín la Bibl. Histórica Marqués Vald.*, no. 24, pp. 60–69, 2016, [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5373313&info=resumen&idioma=ENG%0Ahttps://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5373313&info=resumen&idioma=SPA%0Ahttps://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5373313>
- [19] D. Vázquez *et al.*, “Energy optimization of a light projection system for buildings that virtually restores artworks,” *Digit. Appl. Archaeol. Cult. Herit.*, vol. 16, p. e00128, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.daach.2019.e00128.
- [20] J. Schanda, *Colorimetry: understanding the CIE system*. Hungary: John Wiley & Sons, 2007.
- [21] M. D. Fairchild, *Color appearance models*, no. Book, Whole. Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2013.