

**ADVERTIMENT.** La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX ([www.tesisenxarxa.net](http://www.tesisenxarxa.net)) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

**ADVERTENCIA.** La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR ([www.tesisenred.net](http://www.tesisenred.net)) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

**WARNING.** On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX ([www.tesisenxarxa.net](http://www.tesisenxarxa.net)) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author



Departament d'Òptica i Optometria

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA



Centre de Desenvolupament de Sensors, Instrumentació i Sistemes

## TESIS DOCTORAL

**“UNA METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE  
ILUMINANTES Y DISEÑO DE LA DISTRIBUCIÓN  
ESPECTRAL DE FUENTES LUMÍNICAS PARA LA  
ADECUADA EXHIBICIÓN Y PRESERVACIÓN DE  
OBRAS DE ARTE EN MUSEOS”**

**Fernando F. Arana S.  
Terrasa, Bcn, España, 2014.**

**Acta de calificación de tesis doctoral**

**Curso académico: 2013-2014**

Nombre y apellidos

Fernando Fabian Arana Sema.

DNI / NIE / Pasaporte

22.073.169-D

Programa de doctorado

Ingeniería Óptica

Unidad estructural responsable del programa

Óptica y Optometría (Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial y Aeronáutica de Terrassa)

**Resolución del Tribunal**

Reunido el Tribunal designado a tal efecto, el doctorando / la doctoranda expone el tema de su tesis doctoral titulada “UNA METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE ILUMINANTES Y DISEÑO DE LA DISTRIBUCIÓN ESPECTRAL DE FUENTES LUMÍNICAS PARA LA ADECUADA EXHIBICIÓN Y PRESERVACIÓN DE OBRAS DE ARTE EN MUSEOS”. Acabada la lectura y después de dar respuesta a las cuestiones formuladas por los miembros titulares del tribunal, éste otorga la calificación:

APTA/O  NO APTA/O

(Nombre, apellidos y firma)	(Nombre, apellidos y firma)
Presidente/a	Secretario/a

(Nombre, apellidos y firma)	(Nombre, apellidos y firma)	(Nombre, apellidos y firma)
Vocal	Vocal	Vocal

\_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

El resultado del escrutinio de los votos emitidos por los miembros titulares del tribunal, efectuado por la Escuela de Doctorado, a instancia de la Comisión de Doctorado de la UPC, otorga la **MENCIÓN CUM LAUDE**:

SÍ  NO

(Nombre, apellidos y firma)	(Nombre, apellidos y firma)
Presidenta de la Comisión de Doctorado	Secretaria de la Comisión de Doctorado

Barcelona a \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

***“UNA METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE ILUMINANTES Y DISEÑO DE LA DISTRIBUCIÓN ESPECTRAL DE FUENTES LUMÍNICAS PARA LA ADECUADA EXHIBICIÓN Y PRESERVACIÓN DE OBRAS DE ARTE EN MUSEOS”***

Jaume Pujol Ramo, Catedrático de Universidad del Departamento de Óptica y Optometría de la Universidad Politécnica de Cataluña y Raúl Fernando Ajmat, Profesor adjunto de la Universidad Nacional de Tucumán, Rep. Argentina.

**CERTIFICAN**

que Fernando F. Arana Sema, Arquitecto , ha realizado bajo su dirección y en el programa de Doctorado de Ingeniería Óptica del Departamento de Óptica y Optometría de la Universidad Politécnica de Cataluña el trabajo:

“UNA METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE ILUMINANTES Y DISEÑO DE LA DISTRIBUCIÓN ESPECTRAL DE FUENTES LUMÍNICAS PARA LA ADECUADA EXHIBICIÓN Y PRESERVACIÓN DE OBRAS DE ARTE EN MUSEOS”

para optar al grado de Doctor por la Universidad Politécnica de Cataluña.

Y para que conste, de acuerdo con la legislación vigente, firman el presente certificado,

Jaume Pujol Ramo

Terrassa, Julio 2014

Raúl F. Ajmat

Terrassa, Julio 2014

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a las siguientes instituciones y personas que han hecho posible el desarrollo de este trabajo.

Al Convenio Fundación Carolina de España – Ministerio de Educación, Ciencia y Técnica de la Rep. Argentina, mediante su programa de becas Doctorado 2009, cuyo aporte ha permitido el financiamiento de tres de mis estancias en España durante el proceso de doctorado.

A la Universidad Politécnica de Cataluña y al Centro de Desarrollo de sensores (CD6) en España; a la Universidad Nacional de Tucumán y al Departamento de Luz, Luminotecnia y Visión (DLLyV) en Argentina, instituciones que me han cobijado y en las que he encontrado el apoyo imprescindible en lo académico y personal. Agradecer entre sus autoridades, a los Dres. Elisa Colombo y Eduardo Manzano.

A mis directores de Tesis, los Doctores Jaime Puyol R. y Raúl F. Ajmat, por su guía, disposición de tiempo y de espíritu en las innumerables consultas que son necesarias para un doctorado. Junto a ellos y de manera especial agradezco la contribución completamente desinteresada, voluntaria y generosa del Mg. Ingeniero José D. Sandóval, director del Proyecto de Investigación Iluminación de museos: Presentación vs. Preservación por su constante aporte teórico e instrumental.

A la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Nacional de Tucumán, especialmente en las personas de la Dra. Ma. Rosa Sánchez de Colacelli y la Mg. Arq. Daniela Moreno, por su apoyo a lo largo del tiempo de desarrollo de este posgrado.

A mis padres por su ejemplo, a mis hermanas por su amor y compañía en la distancia. A la amada memoria de Dn. Juan Legname, a quien dedico especialmente el mérito de este trabajo, ya que nos dejó antes de su final.

A Jorge Herrera y en él a todos los becarios del CD6 en Terrassa, por su colaboración, su hospitalidad y su calidez.

Finalmente, a Lucrecia, por su amor, su alegría y su presencia.

Junio de 2014.

## CONTENIDO.

AGRADECIMIENTOS .....	4
CONTENIDO .....	5
LISTA DE FIGURAS .....	8
LISTA DE TABLAS .....	10
<b>1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....</b>	<b>11</b>
1.1. Hipótesis .....	13
1.2. Objetivos .....	13
1.2.1. <i>General</i> .....	13
1.2.2. <i>Específicos</i> .....	14
1.3. Diseño metodológico .....	14
<b>2. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>17</b>
2.1. La Misión del Museo.....	18
2.2. La Presentación .....	19
2.2.1. Aspectos del sistema visual humano relevantes para la Presentación.....	20
2.2.2. El color de los objetos y la luz. El rendimiento de color.....	22
2.2.3. La textura y transparencia de los objetos.....	24
2.2.4. El confort visual.....	25
2.2.5. Iluminación artificial en museos. Lo tecnológico.....	26
2.2.5.a) Fuentes de Iluminación.....	27
2.2.5.b) Los sistemas de distribución.....	27
2.2.5.c) Lentes.....	28
2.2.6. <i>Un criterio básico para iluminar salas de exhibición</i> .....	29
2.3. La Preservación.....	29
2.3.1. El daño foto- químico primario.....	31
2.3.2. Los protocolos y recomendaciones de preservación .....	31
2.3.3. Los Protocolos de Preservación y las otras dos funciones del museo: La Presentación y la Eficiencia.....	35
2.4. La Eficiencia .....	38
2.4.1. La iluminación natural en el museo.....	39
2.4.2. Iluminación artificial. La tecnología de fuentes basadas en LEDs.....	42
2.4.3. Iluminadores de Museos.....	48
2.4.4. Interacción de la luz con los otros elementos del ámbito museístico.....	51

<b>3. METODOLOGÍA DE ADQUISICIÓN DE PERFILES DE REFLECTANCIA ESPECTRAL DE OBRAS DE ARTE.</b>	
3.1 Metodología de adquisición de perfiles de reflectancia de una obra de arte.....	55
3.1.1..Mediciones de la muestra.....	55
3.1.2. Procesamiento de las mediciones espectrales en las muestras.....	59
3.1.3. Método de comprobación de los coeficientes de área.....	65
<b>4. METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE ILUMINANTES Y DE DISEÑO DE LA EMISIÓN ESPECTRAL DE FUENTES .LA PRESERVACIÓN.</b>	
4.1. Metodología de selección de iluminantes CIE. La preservación.....	77
4.2. Radiación, reflectancia y deterioro fotoquímico.....	79
4.3. Cálculo del Factor deteriorante.....	81
4.4 Diseño de la emisión espectral de una fuente.....	83
4.5. Clasificación de los iluminantes CIE según su factor deteriorante.....	85
<b>5. METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE ILUMINANTES Y DE DISEÑO DE LA EMISIÓN ESPECTRAL DE FUENTES. LA PRESENTACIÓN.</b>	
5.1 Presentación y visión de objetos de exhibición en museos.....	89
5.2 Diseño de la emisión espectral de una fuente de uso en museos.....	92
5.2 Evaluación de Iluminantes y fuentes según la diferencia de color.....	92
<b>6. ETAPA EXPERIMENTAL. VERIFICACIÓN DE LA VALIDEZ METODOLÓGICA.</b>	
6.1. Las fuentes de la etapa experimental.....	98
6.2. Las condiciones de exposición.....	102
6.3. Caracterización de las muestras de la etapa experimental. ....	102
6.4. Resultados de la etapa experimental.....	104
<b>7. CONCLUSIONES</b> .....	109
<b>8. TRABAJO FUTURO</b> .....	113
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	115
APÉNDICE A1. Hoja de datos del instrumento de medición.....	123
APÉNDICE B. Perfiles de Reflectancia, de Emisión y de colores de las muestras M1-M4.	124
B1. Muestra Mondrian 1921 (P.R.E.R.); MATCH 1 .....	124
B2. Muestra M2. Klee Farbtable. (P.R.E.R.) MATCH 2 .....	125
B3. Muestra M3. Klee Arkitekturder. (P.R.E.R.) ; MATCH 3.....	126
B4. Muestra M4. Klee. Highway. (P.R.E.R.) ; MATCH 4.....	127
APÉNDICE C. Planillas de cálculos de Factor Deteriorante.....	128

C1. Factor deteriorante (F.D.) para el Iluminante A (CIE) y M1 del capítulo 4.....	126
C2. Factor deteriorante (F.D.) para el Iluminante D65 (CIE) y M1 del capítulo 4.....	127
C3. Factor deteriorante (F.D.) del Iluminador. Perfil de emisión n° 63. M2.....	128
C4. Factor deteriorante (F.D.) de la lámpara Incandescente halogenada. M2. ....	129
C5. Cálculo del Factor deteriorante (F.D.) de la lámpara fluorescente compacta.....	130

## **LISTADO DE FIGURAS**

Figura 1.1. Diagrama de Flujo general.....	15
Figura 2.1. Figura 2.2. El color de los objetos y la luz .....	23
Figura 2.2. Efectos de la interacción de la luz con la textura y transparencia].....	25
Figura 2.3. Ángulos de incidencia de la luz para prevención del deslumbramiento.....	26
Fig. 3.1. Diagrama de flujo de metodología de adquisición de P.R.E.R.....	56
Figura 3.2. Muestras M1, M2, M3 y M4.....	57
Figura 3.3. Montaje para mediciones espectrales.....	58
Figura 3.4. Diagrama de mediciones espectrales.....	58
Figura 3.5. Cantidad y ubicación de las mediciones realizadas en M2, M3 y M4.....	59
Figura 3.6. Mediciones y filtrado de UV. e I.R.....	60
Figura 3.7. Esquema de obtención del C.S.M.....	62
Figura 3.8. Perfiles de Reflectancia Espectral Representativos (P.R.E.R.) de las muestras M1, M2,.....	63
Figura 3.9. Perfiles de Reflectancia Espectral Representativos (P.R.E.R.) de las muestras M3, M4,.....	64
Figura 3.10. Imagen digital e histograma RGB de M2.....	65
Figura 3.11. Imagen digital de M2, ampliación y recorte de la zona de color A1 .....	67
Figura 3.11. Esquema de la integración de histogramas parciales.....	68
Figura 3.13. Esquema de obtención de Coeficiente de píxeles.....	74
Figura 4.1. Diagrama de Flujo de la Metodología de Selección de Iluminantes.....	78
Figura 4.2 Comparación de perfiles de reflectancia y de emisión.....	82
Figura 4.3. Diagrama para el cálculo del factor deteriorante.....	81
Figura 4.4. P.R.E.R. de M1 y MATCH 1, sin escala y en escala.....	83
Figura 5.1. Diagrama de flujo de la metodología de selección de Iluminantes y diseño de emisión espectral de fuentes en función del aspecto presentación de la misión del museo.....	90
Figura 6.1. Iluminador de lámparas de LED.....	98

Figura 6.2. Muestra M2 iluminada mediante el iluminador de lámparas a LEDs. Perfil de reflectancia espectral de la muestra y perfil de emisión del Iluminador.....	99
Figura 6.3. Muestra M2 y lámpara incandescente halógena.....	100
Fig. 6.4. Muestra M2 iluminada mediante lámparas incandescentes halogenadas. Perfil de reflectancia espectral de la muestra y perfil de emisión de la fuente.....	100
Figura 6.5 Muestra M2 y lámpara fluorescente compacta.....	101
Figura 6.6. Muestra M2 iluminada mediante lámparas fluorescente compactas. Perfil de reflectancia espectral de la muestra y perfil de emisión de la fuente.....	101
Figura 6.7. Reproducciones de la Muestra M2. Áreas de exposición.....	102
Fig.6.8. Caracterización de áreas de exposición. Iluminancias y Luminancias.....	103
Figura 6.9. Cambio de color post-exposición de la muestra expuesta a la lámpara fluorescente compacta .....	105

## LISTADO DE TABLAS

TABLA 2.1 Exposición Total anualizada .Fuente: del Hoyo Melendez et al, 2008.....	35
TABLA 3.1. Clasificación de objetos según su sensibilidad al daño por radiación.....	53
TABLA 3.2 . Recomendaciones de exposición anual para objetos de museo .....	54
TABLA 3.3. Cálculo de Coeficiente de píxeles.....	70
TABLA 3.4. Resultados de verificación de coeficientes de área.....	73
TABLA 3.5. Resultados de la verificación del coeficiente de medición .....	75
TABLA 4.1. Clasificación de Iluminantes CIE y MATCH1 para M1.....	86
TABLA 4.2. Clasificación de liluminantes CIE y MATCH 2 para M2 .....	86
TABLA 4.3. Clasificación de liluminantes CIE y MATCH 3 para M3 .....	87
TABLA 4.4. Clasificación de liluminantes CIE y MATCH 4 para M4 .....	87
TABLA 5.1. Perceptibilidad y aceptabilidad CIE.....	94
TABLA 5.2. Selección de Iluminantes CIE según menor diferencia de color para M1.....	94
TABLA 5.3. Selección de Iluminantes CIE según menor diferencia de color para M2 .....	94
TABLA 5.4. Selección de Iluminantes CIE según menor diferencia de color para M3.....	95
TABLA 5.5 .Selección de Iluminantes CIE según menor diferencia de color para M4 .....	95
TABLA 5.6. Diferencia de color CIEL*a*b* para los colores M1 bajo MATCH 1.....	96
TABLA 5.7. Diferencia de color CIEL*a*b* para los colores M2 bajo MATCH 2.....	96
TABLA 5.8. Diferencia de color CIEL*a*b* para los colores M3 bajo MATCH 3.....	96
TABLA 5.9. Diferencia de color CIEL*a*b* para los colores M4 bajo MATCH 4.....	96
TABLA 6.1. Caracterización y cálculo de la exposición total anualizada. Etapa experimental.....	103
TABLA 6.2. Factores deteriorantes. Etapa experimental .....	104
TABLA 6.3. Resultados de cambio de color post-exposición. Etapa experimental. Azul cielo.....	105
TABLA 6.4. Resultados de cambio de color post-exposición. Etapa experimental.....	104

## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**

En los últimos años la temática de iluminación se presenta cada vez más intersectada por la temática ambiental. Dicha relación se plantea debido a las implicancias que resultan del uso de la energía con fines de iluminación y su consecuente impacto en las condiciones micro-ambientales del espacio y las macro-ambientales de lo social, lo que en parte explica su actualidad.

Condiciones micro-ambientales, porque al iluminar empleando las fuentes de incandescencia artificial o la radiación natural, se produce en los espacios y/o superficies un efecto de calentamiento asociado a la iluminación. Macro- ambientales, porque el uso de electricidad con fines de iluminación tiene su correspondencia en la emisión de gases de efecto invernadero, lo que ha llegado a incidir negativamente en el equilibrio ambiental del planeta [CMNUCC Copenhage,2010].

Se trata en última instancia de las condiciones de supervivencia y de bienestar de la población del orbe [UN, 2011].

Luego de profundizar mi formación en el campo de la iluminación, completando en el año 2008, la carrera de posgrado “Especialización en Medio Ambiente Visual e Iluminación Eficiente”, acreditada como Proyecto N° 1 047/98 según resolución N°324/99 de la Comisión Nacional de Evaluación y Acreditación Universitaria – CONEAU, R. Argentina, que se imparte en el Departamento de Luminotecnia, Luz y Visión “Ing. Herbert Bühler” de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán, decidí continuar en el campo de la ciencia y práctica ambiental mediante el cursado del Máster en Arquitectura, Energía y Medio Ambiente de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, de la Universitat Politècnica de Catalunya en el período 2009-2010.

Como parte del Máster AEM, desarrollé junto a las Arquitectas Eliana Cerón Palma y María Rosaria Rizzi un análisis de la iluminación del Museo de Arte Contemporáneo de Barcelona (MACBA) y al momento de cumplir el último requisito para la aprobación del Máster en Arquitectura, Energía y Medio ambiente, en septiembre de 2010 presenté una tesina sobre el tema: “Iluminación de museos, Lineamientos para la presentación y preservación de objetos de museo”.

El desarrollo de la Tesina de Máster, supuso una primera etapa de investigación acerca de los conocimientos más específicos de la iluminación de museos y devino en una toma de decisiones en dos aspectos del ulterior desarrollo del doctorado. La primera decisión implicaba un cambio en el enfoque del tema, la segunda decisión involucraba el contexto y los medios necesarios para acometer la tarea de investigación en una futura etapa de Tesis doctoral.

Inicialmente, la estrategia de abordaje del tema estaba en línea con la que usualmente se aplica en la administración de energía para iluminación en los edificios dentro de la concepción ambiental, o

sea procurar el reemplazo de la iluminación de fuentes artificiales por la iluminación natural, de modo de cubrir la demanda energética de iluminación de los edificios en las horas en las que se dispone del recurso natural y complementariamente, aumentar la eficiencia de la iluminación artificial en las horas en las que no se dispone del recurso natural [Beltrán,2003; Ezrati,2008].

En edificios de función diferente que la de museos, dicha estrategia es viable en tanto se prevean los aspectos de calentamiento asociados al ingreso de cantidades de radiación adicional y se restablezca el balance térmico del edificio para el uso del espacio en condiciones de confort, tanto lumínico como higr-térmico [Beltrán, 2004].

En la iluminación de museos también se emplea ese criterio y se ha logrado un gran avance en su implementación, tanto que uno de los museos más prestigiosos del mundo, tal es el caso del Museo del Louvre, en París, está iluminado parcialmente con luz natural, debidamente controlada y filtrada [Ezrati,2008].

Debe acotarse en relación a este último caso, que la decisión de usar luz natural por parte de los curadores y administradores del citado museo, ha sido posible luego de tomar en cuenta entre otras consideraciones, la sensibilidad ante el riesgo de daño por radiación de las obras expuestas. Las obras iluminadas con luz natural no son las clasificadas como obras de extrema sensibilidad al daño por radiación, sino las de mediana y baja sensibilidad [Ezrati,2008].

Asimismo, el patrimonio exhibido bajo condiciones de iluminación natural, es de propiedad y custodia del museo. Para el caso de las exposiciones itinerantes que el museo alberga, se aplica un criterio diferente. Los espacios en los que se exhiben dichas colecciones se iluminan con luz artificial, posiblemente en cumplimiento de las normativas y condiciones contractuales que suelen enmarcar los préstamos de colecciones en la actividad museística [Rico et al., 2009].

A diferencia de otros edificios, la función y la misión del museo plantean una exigencia muy alta en los requisitos de exhibición y aún mayor en los de conservación. Algunas de las características de la iluminación natural, como ser el difícil control de sus altos niveles de iluminación, la composición de sus contenidos espectrales y la ganancia térmica que se produce en los ambientes por su ingreso, la han hecho objeto de una polémica acerca de su verdadera viabilidad y conveniencia si se analiza el balance final de los beneficios y costos que se originan en su aplicación [Thomson, 1994].

Claramente, la elección de uno u otro tipo de fuente para la iluminación de museos era un asunto de complejidad, que no sólo excedía los límites de una tesina, sino que exigía una primera, documentada y razonada aproximación al tema de la conservación de objetos de museo como paso previo a la toma de decisiones definitiva sobre ese aspecto.

La otra consecuencia fue un cambio en el ámbito de estudio. Luego de profundizar sobre el tema, se hizo evidente que las exigencias de exhibición y conservación que pautan la actividad de iluminación de museos demandan unos conocimientos, equipamiento técnico y especialización, que exceden lo disponible en una Escuela de Arquitectura para temas de iluminación de tal especificidad. A resultas de lo anterior, se decidió la continuidad del trabajo y su correspondiente matriculación en el Programa de Doctorado en Ingeniería Óptica de la Universitat Politècnica de Catalunya en el mes de febrero de 2011.

Finalmente se ha elegido estudiar la iluminación de museos con iluminación artificial por varias razones. Es un tiempo de transición en la actividad de iluminación museológica, enmarcado en un panorama general de reemplazo de lámparas y fuentes de luz que se da en el marco de distintas políticas de eficiencia energética y también debido a la aparición de nuevos tipos de fuentes como son las lámparas de diodos (LEDs).

Consideramos que hacer aportes en el conocimiento del contenido espectral y de la calidad, no simplemente de lo cuantitativo de la radiación visible, es necesario para operar de manera informada en la presentación y en la preservación de objetos en el museo.

El presente trabajo se define como una metodología de análisis, evaluación y manejo de las calidades de luz que se usan en la actividad de iluminar museos y se propone hacer una contribución en la capacidad de administrar con un grado mayor de precisión las consecuencias de decisiones de iluminación.

**1.1. Hipótesis.** La hipótesis sobre la que se apoya este trabajo de tesis doctoral se explica en tres partes:

- 1.1.1 Es posible obtener el perfil de Reflectancia de una obra de arte pictórico, que sea suficientemente representativo de la misma.
- 1.1.2 Iluminar una obra de arte con una fuente cuyo perfil de emisión espectral sea coincidente en su forma, con el perfil de reflectancia espectral representativo (P.R.E.R.) de la obra de arte a iluminar, permite reducir al mínimo el deterioro por iluminación del objeto iluminado, ya que el deterioro por iluminación tiene como factor principal a la radiación visible y a la no visible incidente absorbida. Lo anterior permitiría el máximo cumplimiento de la función de *Preservación*.
- 1.1.3 El estímulo visual resultante de la interacción entre el perfil de emisión espectral (P. E.E.) de la fuente y el perfil de reflectancia espectral representativo (P.R.E.R.), permite una reproducción de color adecuada para el buen cumplimiento de la función de *Presentación*.

**1.2. Objetivos.**

1.2.1. General

Surge de la indagación y lectura de los antecedentes y del estado del arte en la ciencia y la práctica de la iluminación de museos, el objetivo general de este trabajo de tesis doctoral. Realizar aportes concretos que favorezcan el buen cumplimiento de la misión del museo en sus tres componentes que se enuncian sucintamente [Miller, 2005]:

- a. Presentación-exhibición: que consiste presentar al público el patrimonio cultural de la sociedad a la que sirve en su misión, mediante el principio de mínima distorsión [Torres Portero et al., 2008], que implica mostrar la obra en fidelidad a la intención original del autor. Que el público contemporáneo vea, aprecie y goce del patrimonio cultural [Miller, 2005].
- b. Preservación: que consiste en asegurar la conservación de la obra de arte en la función de alojamiento y conservación que el museo cumple en general y en particular, del deterioro ocasionado al iluminar la obra en el cumplimiento de la función de exhibición, o principio del

mínimo deterioro [Torres Portero et al., 2008]. Que las generaciones futuras tengan la oportunidad de ver, apreciar y gozar con del patrimonio cultural [Miller, 2005].

- c. Eficiencia: que el cumplimiento de las dos anteriores funciones se realice mediante la adecuada disposición de los recursos con los que cuenta el museo. Que se logren los máximos resultados con los recursos disponibles [Miller, 2005].

En el entendido de que una aproximación a la iluminación de museos que pueda calificarse como sostenible deberá realizar aportes en cumplimiento de cuando menos uno de los componentes de la misión del museo.

### 1.2.2. Específicos

- a) Desarrollar una Metodología de adquisición y caracterización del/os Perfil /es de Reflectancia Espectral Representativos (P.R.E.R) de una muestra u objeto de exhibición.
- b) Desarrollar un sistema de Iluminación para su utilización en museos, compuesto de una fuente iluminante, de lámparas de LEDs monocromáticas, de distintas bandas de longitud de onda, capaz de combinar emisiones de luz blanca de distinto contenido y perfil espectral (output) en una variedad de opciones determinada y sistematizada en función de la información (input) del Perfil de Reflectancia Espectral Representativa (P.R.E.R) de los objetos a iluminar.
- c) Desarrollar una Metodología de selección de fuentes de Iluminación para su uso en la Iluminación de objetos de exhibición y arte, en cumplimiento de las misiones de presentación, preservación y eficiencia del museo.

### 1.3 Diseño Metodológico.

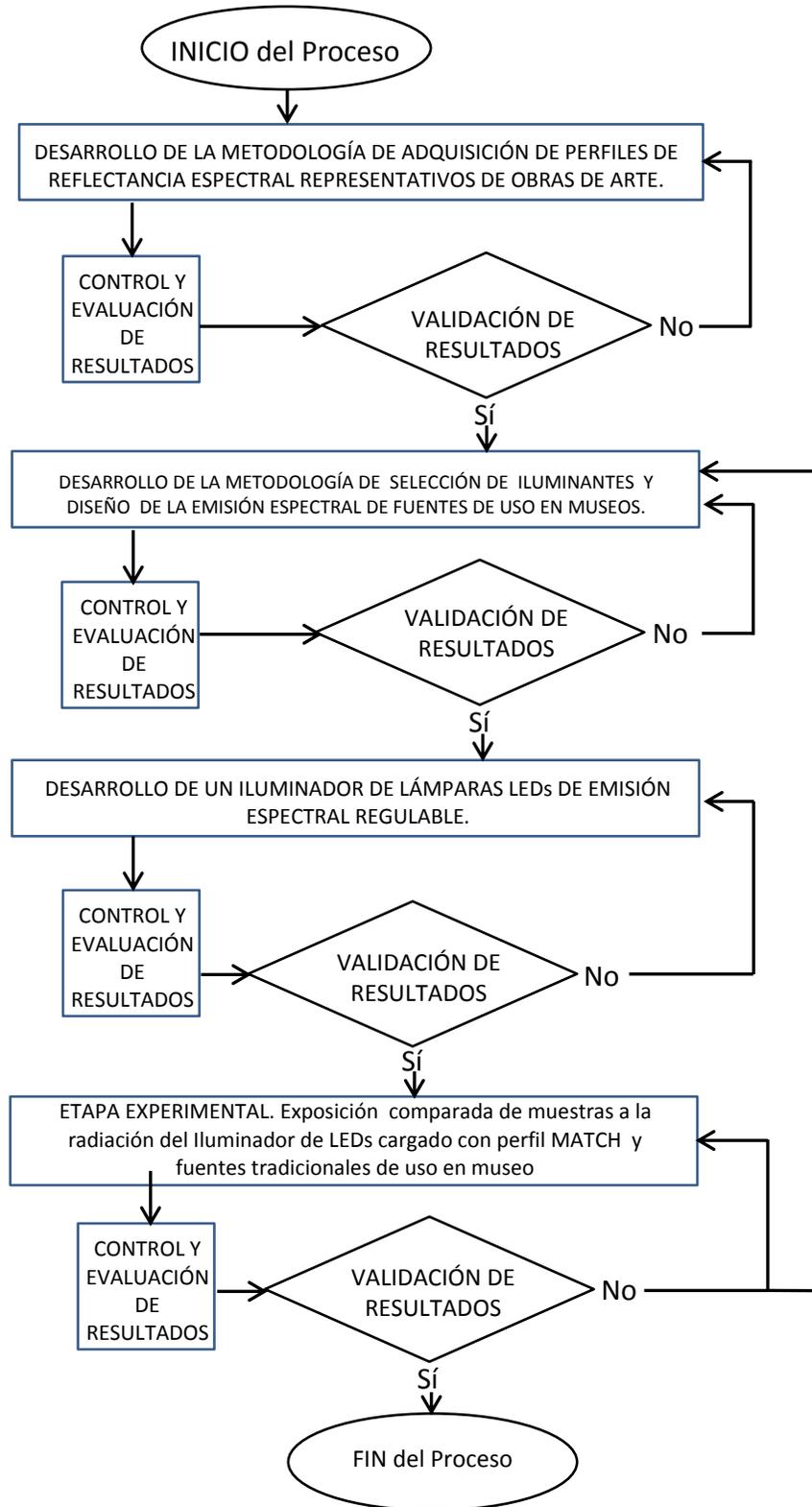
- Relevamiento
 

Bibliográfico.	De requisitos y normativas de iluminación de museos: Iluminancias, Luminancias; otros. De requisitos y normativas de preservación: Luminotécnicos , Térmicos y de H°R°. Del estado del arte en la Iluminación de museos.
De museos.	Museo de Arte Contemporáneo de Barcelona. Museo y Centro Cultural Reina Sofía. Museo del Louvre, París, Francia.
- Análisis
 

De los requisitos y normativas de Iluminación de museos.
De los requisitos y normativas higro-térmicas de museos. Del grado de adecuación de los valores de iluminancia e higro-térmicos de los museos relevados a los requerimientos de preservación de objetos.
- Propuesta-Hipótesis.
 

Elaboración de la propuesta, objetivos e hipótesis. Justificación de la propuesta de tesis doctoral. Elección y definición de las variables independiente y dependiente.
--
- Instrumentación y Procesamiento de las variables.
 

Medición, experimentación y verificación de la hipótesis. Simulaciones, cálculos, ensayos y mediciones. Establecimiento y verificación de relaciones causales
---
- Análisis de resultados y conclusiones.
- Redacción del documento final de tesis doctoral



**Figura 1.1 Diagrama de Flujo general.**

Los capítulos de esta tesis doctoral están ordenados de la siguiente manera: el Capítulo 2 ha sido dedicado a la revisión bibliográfica del estado del arte de la cuestión, en un ordenamiento que toma en cuenta la misión del museo en sus tres componentes: la presentación, la preservación y la eficiencia.

Los capítulos 3 al 5 elaboran el desarrollo de la metodología propiamente dicha, primero en su etapa de adquisición y deducción de perfiles de reflectancia representativos de las muestras utilizadas y posteriormente en la fase de evaluación de los Iluminantes CIE y del diseño de emisiones espectrales, tanto para el aspecto de la preservación como para la fase de presentación.

El capítulo 6 trata de la etapa experimental que comporta la validación de lo desarrollado en la metodología con los resultados de verificación de la hipótesis.

Finalmente, los capítulos 7 y 8 se elaboran las conclusiones que se obtienen de lo realizado y se plantean las posibilidades a futuro en la continuidad de la línea de trabajo iniciada.

## **2. ESTADO DEL ARTE**

En el presente trabajo se estudia la energía en su manifestación como luz visible estableciendo su límite en los rangos próximos de radiación no visible a ambos lados del espectro. Es necesario recordar que la naturaleza más esencial de la energía no se conoce. A decir de Thomson : *“Lo que la ciencia ha logrado hacer con mayor éxito, es medir y cuantificar mediante sistemas y modelos físicos, los cambios y las transformaciones que la energía sufre y los cambios que provoca en el ambiente y en los objetos.”* [Thomson,1994].

Una de las características de la energía es que se conserva: esto significa que la cantidad total de un sistema energético cerrado permanece constante. El modelo que permite esta explicación se basa en la convención de convertir en energía potencial de cualquier tipo, a aquella cantidad de energía que parece desaparecer cuando se produce una transformación de una hacia otra de sus tantas posibles manifestaciones. [Thomson,1994].

La iluminación artificial de edificios, se desarrolla sobre una matriz energética que tiene como componente mayoritario a los recursos energéticos fósiles. El carácter no renovable de dichos recursos y su consecuente finitud, son hechos conocidos y aceptados por la comunidad científica. Aunque con discrepancias, están definidas incluso la cantidad residual y la viabilidad de su disponibilidad como recurso energético [CMNUCC Rio de Janeiro,1992; CMNUCC, Kyoto 1994; CMNUCC Malasia 2004; CMNUCC Copenhagen,2010].

Ponderar el porcentaje del consumo energético de los edificios sobre el total de consumo de una sociedad, permite hacerse una idea aproximada del impacto que el uso de la iluminación y el acondicionamiento ambiental en los edificios tiene en el consumo energético total de una sociedad. En los países bajos, se estima que en el uso energético en el entorno construido representa un 35% del total [Hoes,2008] y en EE.UU. el 40% del total, en una cifra que representa por sí sola 350 mil millones de dólares [Chen,2009].

Adicionalmente al problema de su progresiva escasez que se decanta en las distintas estrategias para su reemplazo, la emisión de gases hacia la atmósfera que son producto de la combustión de recursos energéticos fósiles, ha generado una serie de trastornos en la biósfera y desequilibrios en el medio ambiente, caracterizados por fenómenos tales como el llamado calentamiento global [CMNUCC Rio de Janeiro,1992; CMNUCC, Kyoto 1994; CMNUCC Malasia, 2004; CMNUCC Copenhagen,2010].

Como consecuencia de lo anterior se han implementado distintas estrategias tanto para reducir el consumo de recursos energéticos no renovables, cuanto para encontrar alternativas de reemplazo renovables, como ser la energía eólica, solar, los biocombustibles, energía de origen marítimo, o la termonuclear entre otras. Se han diseñado y se llevan adelante con resultados heterogéneos,

políticas de reducción de consumo y de aumento de la eficiencia energética en la mayoría de los ámbitos de la actividad y producción humanas [CMNUCC Rio de Janeiro, 1992; CMNUCC Kyoto, 1994; CMNUCC Malasia, 2004; CMNUCC Copenhague,2010].

En el campo de la iluminación, se pueden establecer cuando menos tres momentos distintos en la consideración de la eficiencia luminosa y su interacción con el bienestar micro y macro-ambiental. La primera de esas etapas está marcada por la invención de la lámpara incandescente y el rápido crecimiento de las redes de distribución de energía eléctrica y las correspondientes redes de iluminación tanto de edificios, como alumbrado público o vial y de instalaciones especiales. Los esfuerzos se dirigen en esa primera fase, al logro de mayor potencia de emisión y máxima cobertura geográfica de la luz artificial [Boyce, 2005].

Una vez completado el primer ciclo, la eficiencia en la iluminación estuvo durante décadas en una segunda fase caracterizada por un criterio de iluminación que hacía equivalente lo más a lo mejor, con un aumento considerable en las cantidades de luz requeridas por el propio criterio regulador de la actividad y en las consecuentes cantidades de luz provista para las distintas tareas visuales. Tipifica a este período un sostenido incremento de cantidad en las normas de Iluminancias requeridas para la iluminación de las tareas visuales. Luego de los éxitos iniciales en el completamiento de las redes de distribución y la capacidad cada vez mayor de aumentar la cantidad de luz artificial presente en los espacios, la crisis de petróleo de 1973, puso al descubierto la fragilidad de la matriz energética sobre la que descansaba tal estrategia de iluminación y del criterio sobre el que se sostenía, que implicaba una dotación ilimitada de recursos energéticos [Boyce, 2005].

Resultado de lo anterior, son los desarrollos tecnológicos que procuran aumentar la eficiencia de producción de flujo lumínico en las lámparas de fabricación industrial, con cambios el modo de producir luz, pasando del tradicional método incandescente a las lámparas de descarga compactas (FCL) en 1979, por mencionar sólo un ejemplo [Van der Plas et al.,1988].

En la tercer etapa o fase, se suma a la necesidad de una máxima eficiencia energética en la producción y distribución de luz, la necesidad de contemplar otros aspectos de la iluminación eficiente incluidas en ellas el confort visual, dentro de una estrategia que contempla además, la caracterización de la tarea visual, el uso del contraste y el color en relación a la agudeza visual tanto para la visión, cuanto para la iluminación eficiente [Boyce, 2005].

Complementariamente, en este período posterior a la crisis del petróleo de 1973 se registran los primeros esfuerzos de reemplazo de fuentes. En el campo de la iluminación artificial esto llevará en 1979 a la presentación de la nueva lámpara fluorescente compacta; así también se busca el reemplazo gradual de la iluminación artificial por la de fuente natural, un recurso energético renovable y disponible sin costo para la iluminación de edificios [Van der Plas et al.,1988; Boyce, 2005].

## **2.1. La Misión del Museo.**

Los orígenes de la actividad museológica se remontan a Grecia, pero su actividad tal como la conocemos se ha desarrollado en el período histórico conocido como Modernidad. La creación del Museo del Louvre en Francia en 1793, de la Galería Nacional de Londres en Inglaterra en 1824 y del Museo del Prado en España en 1809, marca algunos de los puntos más importantes en la

creación de instituciones y edificios cuyo fin es la exhibición del patrimonio cultural de la humanidad y su adecuada preservación–conservación [Lopez Valeiras, 1993].

La misión del Museo como agente de la cultura se desarrolla en tres ejes que se explican brevemente:

2.1.1. Presentación: Coleccionar y exhibir obras de arte, piezas y artefactos significativos, algunos de ellos irremplazables, de la actividad y la cultura humana. La actividad museológica abre sus puertas al público mediante las exhibiciones de todo tipo, pero su tarea comienza mucho antes en los trabajos de adquirir, alojar temporaria o definitivamente el patrimonio cultural que custodia. Empero, todo museo debe exhibir para cumplir cabalmente con su función. Si un museo no exhibe el patrimonio que aloja y protege, su misión se desvirtúa, convirtiéndose en un archivo. Se comprende que sin la interacción con el usuario que mira, disfruta y completa el hecho artístico, el aporte cultural de la actividad museológica no puede realizarse [Lopez Valeiras; 1993; Miller, 2005; Rico, 2009].

2.1.2. Preservación / Conservación: Ambas acepciones se encuentran en diferentes autores como aquella función del museo que consiste en proteger las colecciones que aloja temporaria o definitivamente.

*“Es la responsabilidad que el museo toma para sí y que desarrolla en un primer momento mediante el alojamiento de los artefactos, piezas y obras de arte en las condiciones higro-térmicas, de calidad de aire y de iluminación, adecuadas para su correcta preservación, pero sobre todo en el momento de la exhibición, cuando se cumple verdaderamente su función y misión cultural.”* [Miller, 2005].

2.1.3 Eficiencia: Es el aspecto de la misión del museo en la que se prioriza el uso eficiente y efectivo en el sentido más amplio del término, de los recursos patrimoniales, administrativos, de equipamiento, de personal y en suma, de toda índole [Miller,2005].

## **2.2. La Presentación.**

Para el tema que aquí se trata, la atención se ha enfocado en los aspectos relacionados a la tarea de iluminar objetos, piezas y obras de arte, en particular el modo en que esto impacta en las demandas del recurso energético, siempre en relación y en delicado equilibrio con los otros aspectos antes listados y descritos [Miller, 2005].

Se ha dicho de la misión del museo, que su componente primaria consiste en asegurar mediante la adecuada presentación, que el público vea y aprecie en su totalidad los objetos exhibidos. De acuerdo a la institución rectora para temas de Iluminación en EE.UU., IESNA, en su manual de iluminación, hay cuatro modalidades de exhibición en museos:

1. Planas en superficies verticales (pinturas sobre muros);
2. Cajas de exhibición (objetos que por tamaño o rareza lo demanden);
3. Objetos tri-dimensionales (esculturas) y
4. Ambientes realistas [IESNA, 2011].

Cada uno de ellos presenta su propio y particular desafío en el arte de iluminar que debe resolverse tanto en el diseño de la presentación y de su correspondiente iluminación, incluida la elección de la fuente y el diseño de la luminaria a utilizar [Porter, 2003].

Son varios los requisitos que deben satisfacerse para que la función de presentación se cumpla cabalmente. En la búsqueda de su cumplimiento se sigue el *principio de mínima distorsión* [Torres Portero et al., 2008], principio que establece que debe asegurarse de las condiciones ambientales en general y de iluminación en particular que permitan la percepción de la obra de arte de modo fiel a la intención inicial del autor [Torres Portero et al., 2008].

Lo anterior lleva a recordar que el fenómeno de la visión está compuesto por la convergencia de una tríada de factores intervinientes: el sistema visual humano (S.V.H.) que recibe y procesa el estímulo, la radiación en su espectro visible (R.V.) y finalmente las características del objeto observado. Los dos últimos, al interactuar mediante la reflexión y la transmisión se convierten en el estímulo a ser percibido, procesado e interpretado [Colombo & O'Donnell, 2010; Berns et al, 2000].

#### 2.2.1. Aspectos del sistema visual humano relevantes para la misión de presentación.

Comprender cómo funciona el sistema visual humano (S.V.H.) es esencial para una iluminación efectiva y eficiente. El sistema visual humano consiste en dos componentes que se combinan para su funcionamiento: el ojo y el cerebro.

A pesar de ser un sistema complejo y flexible, el ojo humano no determina por sí sólo, qué o cómo vemos. Esto más bien tiene que ver con el cerebro y su interpretación de la información introducida por el ojo [Colombo & O'Donnell,2010]. Este sistema no ha evolucionado para ver objetos de museo sino para la caza y la recolección de alimentos, así como para evadir depredadores. Un amplio rango adaptativo es provisto por el ojo a través de dos tipos de receptores llamados bastones y conos que se encuentran en la retina, cumpliendo las funciones de sensor del estímulo percibido [Miller,2005]; [Colombo & O'Donnell,2010].

En la retina del ojo humano existen dos tipos de células receptoras, sensibles a la zona del espectro electromagnético conocida como luz: los bastones y los conos. Ambos poseen propiedades distintas y operan bajo condiciones diferentes [Miller,2005; Colombo & O'Donnell,2010]. Hay sólo un tipo de bastones que operan bajo condiciones de baja luminosidad y tres tipos de conos cuya sensibilidad es mayor a la alta intensidad de iluminación. Las salidas de varios bastones adyacentes suelen converger a una única neurona, lo que aumenta la sensibilidad a la intensidad luminosa de este tipo de células pero reduce su capacidad de resolver detalles, también llamada agudeza visual [Miller,2005; Colombo & O'Donnell,2010].

Existen en cambio tres tipos de conos dotados de sensibilidad a las longitudes de onda cortas (S), medias (M) y largas (L). Cada uno de ellos posee un foto-pigmento con una curva característica de absorción respecto de la longitud de onda. Este hecho constituye el punto de partida fisiológico para la percepción del color [Miller,2005; Cuttle,2007].

Para la visión en condiciones de alta iluminación, también llamada *fotópica* ( $L > 10 \text{ cd/m}^2$ ), el ojo es capaz de proveer información para la imagen y el color, en condiciones de baja iluminación, sólo es posible distinguir forma y movimiento sin percepción de color, lo que recibe el nombre de visión *escotópica* ( $L < 10^{-3} \text{ cd/m}^2$ ). A la transición entre ambos tipos de visión se le llama *mesópica* [CIE,2004].

Los objetos categorizados como frágiles y/o muy susceptibles al daño por iluminación, debido a las restricciones de nivel de iluminación, deben ser observados en el rango de visión mesópica [IES, 2011].

Experimentalmente, la visión de color es posible a niveles tan bajos de iluminación como 20 o 30 Lux, que son los típicamente dispuestos para la observación de objetos altamente sensibles al daño por radiación, aunque debe acotarse que dichos experimentos se realizan con cartas de color, no con objetos tridimensionales de variada reflectancia [Miller, 2005; Berns et al, 2000].

La adaptación a la oscuridad, es la capacidad del sistema visual humano de pasar de una visión fotópica a una escotópica y toma tiempo para producirse ya que en un organismo sano y joven exige un lapso en el rango de los treinta a cuarenta y cinco minutos. En personas de la tercera edad, estos tiempos se alargan aún más [Miller,2005].

En la iluminación de museos es de suma importancia tener en cuenta estos fenómenos debido a los niveles bajos de iluminación que por razones de preservación y conservación deben emplearse en los objetos altamente sensibles al deterioro por iluminación. En condiciones de baja iluminación, se debe favorecer el contraste entre fondo y objeto, ya que es un factor que colabora en la agudeza visual en tales condiciones de visión [Colombo & O'Donnell, 2010]. También debe darse el suficiente tiempo de recorrido para permitir la adaptación del usuario a niveles bajos de iluminación [Miller,2005].

Debe por otra parte, mantenerse un balance equilibrado de niveles de iluminación entre las distintas áreas de exposición para evitar la necesidad de nuevas y sucesivas adaptaciones que pueden llegar a disminuir sensiblemente la capacidad de ver adecuadamente y por ende, de una buena presentación [Miller,2005 ; Cuttle,2007].

El sistema visual humano tiene la habilidad única de realizar un tipo de adaptación cromática a la luz que contiene distorsiones en su balance de color, sea por su paso a través de vidrios y filtros de color o bien por el espectro de sus emisiones. Esto consiste en que el cerebro corrige la visión del color compensando sus valores de modo de reconfigurar una visión aproximadamente normal, que reduce la percepción del desbalance real de colores presentes en la luz [Miller, 2005; Cuttle 2007]. Los sistemas fotográficos no tienen tal capacidad, por ello es que las fotografías tomadas con luz de tungsteno salen amarillas y las tomadas con luz fluorescente salen verdes o azules (Fig. 1a) [Miller, 2005].

Se ha visto que una de las condiciones que permiten ver es la cantidad y el nivel de iluminación. Esto es así en el amplio rango que comprende la visión y es especialmente así en el rango de visión fotópica cuyos niveles de iluminación permiten además, percibir el color. Pero no es menos cierto, que el sistema visual humano funciona por percepción de diferencias, sean éstas de nivel de iluminación, de contraste y/o de color [Miller, 2005; Colombo et al., 2010; IES, 2011].

Existe la llamada *sensibilidad de contraste*. Es un fenómeno de la visión, frecuentemente representado por una curva de saturación en la que, a cierto nivel de iluminación y en función de la *agudeza visual* del *sistema visual humano* no se puede ver más ni mejor, simplemente con aumentar la Iluminancia. Para mejorar la visión se deberá mejorar el contraste entre el objeto visto y el fondo sobre el que se ve el objeto [Colombo et al., 2010].

En contextos como el de un salón de exhibición de museos que presenta y exige niveles de iluminancia entre los 50 y 500 lux para iluminar objetos de media y baja susceptibilidad al daño por radiación, e incluso a niveles tan bajos de 20 lux con el que se iluminan objetos altamente susceptibles al daño por iluminación, todavía hay aunque acotado, un margen de posibilidades de ver bien. Es parte de un buen diseño de iluminación favorecer la sensibilidad de contraste en la función de presentación, además de prever todas las condiciones que faciliten la adaptación visual a niveles bajos de iluminación.

Un dato pertinente a tener en cuenta cuando se piensa en la respuesta del sistema visual humano al iluminar museos, es que el sujeto receptor típico que asiste a los museos está compuesto poblacionalmente *en más del 50% por mayores de 50 años* [Miller, 2005].

Este colectivo social es también el que presenta la mayor proporción de casos de visión reducida, cuyas causas frecuentemente tienen relación con la edad. Para ellos, la posibilidad de ver bien puede reducirse severamente en la medida en que se reduzcan la Iluminancia y/o la Luminancia de un ámbito.

Los mayores además tienen una capacidad de *adaptación visual*, menor en un 50% comparada con la de una persona de 20 años y una sensibilidad al azul y al violeta reducida hasta en un 30% comparada con la de una persona joven [Miller, 2005].

También las personas de edad tienen una más lenta recuperación al deslumbramiento y puede tomarles hasta 15 minutos más que a una persona joven, recuperarse del deslumbramiento en condiciones de bajos niveles de iluminación [Miller, 2005 ;Colombo et al., 2010].

Un tema de gran importancia en la Iluminación de museos es el desempeño visual (*visual performance*). Nuevamente se hace énfasis en la presentación como el objetivo central de la actividad de iluminación museística y de la museística, debido a que antes que nada, se debe exhibir un objeto para poder ser aprehendido por el público usuario en igual importancia que la preservación [Miller, 2005].

Un objeto pobremente iluminado es un objeto parcialmente perdido, como reconoce la CIE en su publicación al respecto [CIE, 2004] de modo que en contextos de baja iluminación cobran relevancia trabajos que exploran las mejoras del rendimiento visual en situaciones de bajo contraste (menor al 10%) con la introducción de color [O'Donnell & Colombo, 2010] mejoras en el rendimiento visual mediante el incremento de contraste [O'Donnell & Colombo, 2008] para visión de pequeños detalles, especialmente, en las personas mayores de edad .

### 2.2.2. El color de los objetos y la luz.

El problema del rendimiento de color se puso de relieve en los años setenta por la presencia de las nuevas tecnologías que emergieron para hacer frente al problema del consumo energético asociado a la iluminación [Berns et al, 2000], en los años subsiguientes a la crisis desatada por la suba del precio del barril de petróleo.

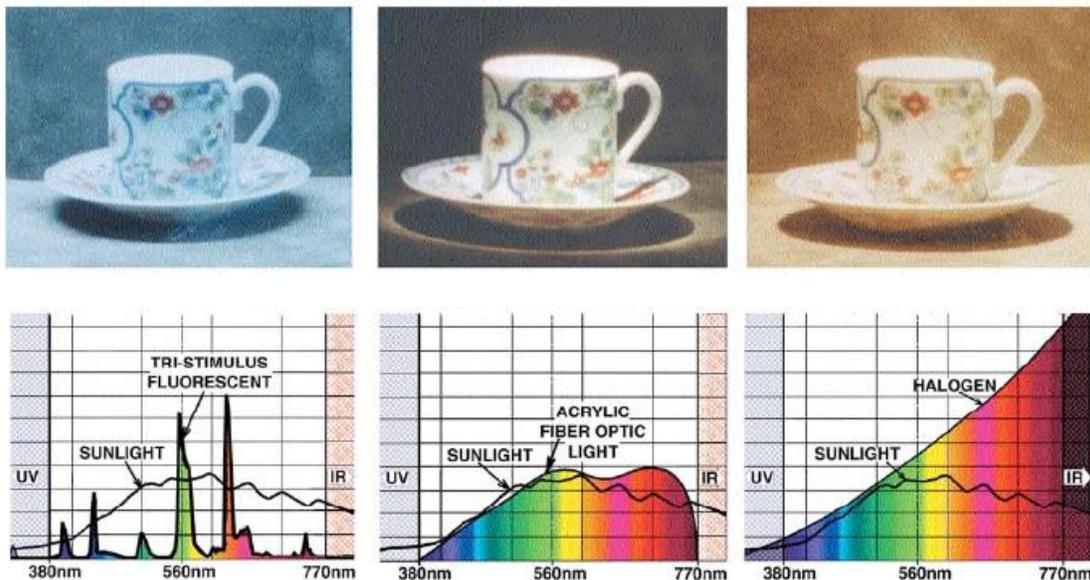
Particularmente en el caso de la lámpara fluorescente, se mejoraba el estado del arte en eficiencia energética, pero ofrecía un pobre desempeño en términos de rendimiento de color. El rendimiento de color y su calidad se calcula en un procedimiento que toma en cuenta la sensibilidad de color del ojo humano y su capacidad de adaptación cromática.

Suponemos que los objetos tienen color y de hecho esto es parcialmente cierto, ya que un objeto cualquiera tiene la capacidad de reflejar la longitud de onda de un cierto color y absorbe el resto de las longitudes de onda que llegan hasta él. La longitud de onda reflejada es la que finalmente estimula al ojo y a eso llamamos color [Berns et al, 2000; Miller, 2005].

El color percibido depende del producto de una interacción dinámica y compleja entre los tres componentes de la visión: de las longitudes de onda presentes en la energía de una fuente de luz, de la composición molecular de la superficie de un objeto que refleja unas y absorbe otras longitudes que a él llegan y de la capacidad del receptor que es estimulado por las longitudes presentes en la luz y reflejadas por el objeto [Miller, 2005].

No son iguales las emisiones de distintas fuentes, ni lo son las características de reflexión y absorción de los distintos objetos y por supuesto, no es lo mismo un receptor artificial que el ojo humano. Como se ha explicado antes, el sistema visual humano tiene la habilidad única de realizar la adaptación cromática, corrigiendo la visión del color compensando valores de modo de reconfigurar una visión aproximadamente normal que reduce la percepción del desbalance real de colores de la luz [Miller, 2005].

Las lámparas usadas comúnmente en la iluminación de museos del tipo incandescente halógeno, aunque presentan el perfil de emisión más parecido al de referencia, que es el de la luz natural, aunque para experimentos en color es el iluminante teórico D65 [IES,2011], pueden tener problemas de balance de color si la energía emitida por la lámpara está muy concentrada en los amarillos y rojos y/o muy debilitada en los azules y violetas. Si así ocurriera, el fenómeno es idéntico a ver la luz a través de un cristal amarillo. La mente humana realiza su adaptación a un escenario teñido de amarillo, y la corrige mediante compensación (Fig. 2.1) [Miller, 2005].



**Figura 2.1. El color de los objetos y la luz [Miller, 2005].**

En el caso de las lámparas de descarga, algunas de ellas usadas en la iluminación de base en museos, se produce el mismo fenómeno, pero con un predominio de los verdes y los azules sobre

los amarillos y rojos, lo que fuerza al sistema visual a una adaptación cromática por compensación [Miller, 2005].

La luz natural es la que mejor reproducción de color ofrece, debido a que es la luz bajo la que ha evolucionado la visión humana. En razón de esa misma evolución, también por su temperatura de color y por su carácter cambiante es la que mejores condiciones de agudeza visual, percepción del color y confort visual ofrece a la visión humana.

Como se ha explicado, la prueba que se muestra en las fotografías se ha realizado en idénticas condiciones, es decir la misma taza, la misma cámara fotográfica. Se muestra elocuentemente la diferencia de reproducción de color de las distintas fuentes de luz. Si bien la adaptación cromática corrige parte del fenómeno en condiciones en las que no se dispone de las tres imágenes para comparar la visión de cada una de ellas, queda establecida la pérdida parcial de calidad de la visión y por ende de la presentación [Miller, 2005].

De las curvas espectrales (Fig 2.1.) se observa claramente el desfase entre las de las fuentes artificiales y la natural. Se puede calcular el área integrada no coincidente con la curva espectral de la luz natural. A esto se da en llamar Desbalance de Color Correlacionado. Cuanto mayor es el valor del área no coincidente con la luz natural, es esperable una menor calidad en la visión de color [Miller, 2005].

En las mediciones comparadas, también se da el fenómeno de algunos colores reproducidos bajo un cierto tipo de lámpara de una determinada distribución de potencia espectral, se perciben igual cuando son vistos bajo otra fuente de distinta distribución de potencia espectral. A esto se llama *metamerismo*. [Thomson, 1994; Coaton & Marsden, 2001].

Finalmente, la convención para calcular la temperatura de color es utilizar la luz natural y la de la lámpara de Tungsteno como estándares de comparación. Las mediciones espectrales de las lámparas de descarga se comparan con las mismas mediciones de los estándares en una Temperatura de color correlacionada. [Assaf, 2005; Miller, 2005].

Sin embargo, debe notarse que recientes trabajos acerca de la capacidad de discriminar de colores en observadores sanos y con patologías en la visión, han puesto en cuestión la validez del CRI como índice capaz de caracterizar completamente la capacidad de reproducción de color de una fuente y más importante aún, la capacidad de un observador sano o un observador con patologías en la visión, de discriminar una determinada cantidad de colores. Los resultados de dichos estudios indican que la correlación entre un índice de CRI alto y una alta capacidad de discriminar colores de una escena es baja a media en observadores sanos y decididamente baja entre observadores con patologías de la visión [Maciel Linhares et al., 2010].

### 2.2.3. La textura y transparencia de los objetos.

Un factor que también debe tenerse en cuenta al iluminar objetos de un museo es la textura y transparencia de lo exhibido. Un objeto, además de tamaño, forma, proporción y color tiene una determinada cualidad de transparencia y textura. En función a su grado de transparencia un objeto podrá ser:

- Opaco, si no deja pasar la luz ni la imagen a través suyo.
- Traslúcido, si deja pasar la luz pero no la imagen.
- Transparente, si deja pasar la luz y la imagen a través suyo [Miller, 2005].

El tipo de reflexión de la luz que se produce un objeto puede ser:

- Especular. Los rayos se reflejan en una dirección. El objeto tiene una apariencia brillante.
- Difusa. Los rayos se reflejan en distintas direcciones.. La apariencia es mate.

Las diferentes combinaciones posibles entre estas dos características de un objeto pueden tener consecuencias no deseadas de iluminación, si se producen brillos no deseados, producidos por el ángulo de la reflexión o por efecto de la transparencia del objeto, que eventualmente produzcan deslumbramientos y otras afecciones al confort visual. En circunstancias en las que no se prevén tales fenómenos, simplemente no permitirán una adecuada presentación del objeto exhibido (Fig.2.2) [Miller,2005; Cuttle,2007].



**Figura 2.2. Efectos de la interacción de la luz con la textura y transparencia [Miller,2005].**

#### 2.2.4. El confort visual.

Como se anticipa en los anteriores apartados, el deslumbramiento puede afectar de distintas maneras la capacidad de ver bien y con ello dejar de cumplirse la buena presentación de los objetos exhibidos. Pueden producirse problemas de deslumbramiento en áreas de gran brillantez, como ser ventanas y/o en el encuentro con la luz directa o reflejada de fuentes de niveles relativamente altos de iluminación [Cuttle, 2007].

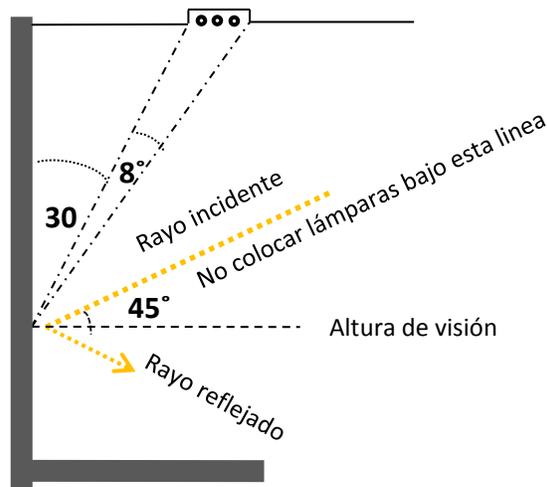
El fenómeno de deslumbramiento es producido por el ingreso de luz al interior del ojo humano, de un nivel comparativamente alto con la adaptación que la retina y el sistema visual tienen a un determinado momento, lo que produce una ceguera temporal inmediata y fuerza al ojo a una adaptación desde el nivel de iluminación máximo registrado hacia un nuevo y más bajo nivel de iluminación promedio. Cuanto más bajos sean estos niveles promedio de iluminación y cuanto mayor sea el diferencial de nivel a salvar mediante la adaptación visual, mayor será el tiempo necesario para su completamiento, que puede llegar a tomar en organismos sanos y jóvenes un lapso de entre treinta y cuarenta y cinco minutos [Thomson,1994; Miller,2005; Cuttle, 2007].

Las causas del deslumbramiento son varias: rayos de luz que vienen de fuentes directas situadas en el fondo o al lado de un objeto exhibido en un contexto de niveles de iluminación más bajos o por reflexión en superficies altamente reflectantes, entre ellas incluso otros objetos de exhibición y

más frecuentemente, las partes metálicas y superficies altamente reflectantes del propio edificio [Miller,2005; Cuttle, 2007].

El ángulo con el que el rayo de luz hace ingreso al ojo es clave para que se produzca el deslumbramiento. Los estudios realizados sobre dicho fenómeno aplicados a la práctica de la actividad de iluminar museos, han sintetizado un criterio básico de ángulos que deben regir la relación de la posición de las fuentes de iluminación en los museos y las obras a ser exhibidas como se ilustra en la siguiente figura para el tipo de exhibición plana en superficies verticales (Fig. 2.3) [IES, 2011].

Las instalaciones de museos tienen unas flexibilidades de movimiento y ajuste dadas por los distintos sistemas de posicionamiento de las fuentes que a su vez dependen de un adecuado mantenimiento. Se puede mantener los ángulos de prevención al deslumbramiento mediante la regulación en altura de lo exhibido. De ser necesario, complementar mediante una inclinación de los objetos bidimensionales levemente hacia abajo, siempre y cuando dicha inclinación no supere los 5 grados entre el objeto y el muro de soporte y fondo [Thomson,1994].



**Fig. 2.3 Ángulos de incidencia de la luz para la prevención del deslumbramiento [Thomson, 1994].**

#### 2.2.5. Iluminación artificial en museos. Lo tecnológico

El diseño de la iluminación artificial supone evaluar el desempeño de las distintas fuentes y del conjunto tecnológico necesarios para su funcionamiento en la iluminación de objetos de exhibición en museos.

El requisito a satisfacer es crear las condiciones óptimas para ver objetos. En ello se incluye no sólo la iluminación específica de los propios objetos dentro de las mejores condiciones en cuanto a niveles de iluminación en arreglo a lo normado para la función, un máximo desempeño en la reproducción del color y una adecuada temperatura de color, sino también la satisfacción de las condiciones de confort visual [Boyce, 2005; Miller,2005; Thomson,2008].

También los sistemas de iluminación complementarios y utilitarios como ser: luces de emergencia, de servicio, de seguridad y otros, además de cumplir efectiva y eficazmente su función, requieren una integración armónica y sistémica en la totalidad del diseño que tomará en consideración los

movimientos implícitos en una muestra, la orientación y direccionamiento de los recorridos y las eventuales necesidades de adaptación visual a diferentes niveles de iluminación [Miller, 2005].

#### 2.2.5.a) Fuentes de Iluminación.

Al considerar la iluminación artificial, la fuente de luz debe siempre ser la primera decisión en el desarrollo del esquema de iluminación [Miller,2005; Thomson,2006]. La capacidad de las fuentes de luz para rendir el color, es crucial en la iluminación de museos. La medida estándar de esa capacidad es el Índice de Rendimiento de Color (*Color Rendition Index*). Convencionalmente un IRC de 100 representa a la luz natural y a la lámpara de incandescencia. La base de estas mediciones es la comparación entre la capacidad de distinguir color con precisión en condiciones de luz natural y luz artificial [IES, 2011].

La mejor opción de fuente artificial en éste aspecto que se obtiene de las mediciones, es la lámpara de Tungsteno halógena (TH) con un CRI de 99. A pesar de ello, del estudio del espectro de la lámpara TH sabemos que es diferente del de la luz en que tiene valores más altos en el amarillo y en el rojo, pero es muy similar a la luz natural en que su espectro es continuo, un factor de importancia en la respuesta perceptual humana [Miller, 2005].

Las únicas otras fuentes testeadas que obtienen un CRI superior a 90 son ciertos tipos de lámparas fluorescentes, que a diferencia de la luz natural tienen un espectro discontinuo, pero que llegan a resultados razonablemente cerca de la respuesta del ojo ante la luz natural [Miller, 2005; Torres Portero, 2008]. Otras fuentes de luz, incluyendo la mayoría de las lámparas fluorescentes, Metal Halide y White SON, de las que se considera que tienen una buena reproducción de color, obtienen una calificación de CRI de 85 y no deberían ser elegidas para la función de iluminar museos, donde el rendimiento del color y la posibilidad de discriminarlos son tan importantes [Miller, 2005; Torres Portero, 2008].

Estas fuentes tienen un rol en la iluminación de las partes del museo que no pertenecen a la exhibición, también llamado iluminación auxiliar o complementaria, tales como el alumbrado de emergencia, de servicio y de seguridad [Miller, 2005; Torres Portero, 2008].

Otro factor de importancia en la selección de fuentes de luz es la temperatura de color. Se expresa en grados Kelvin y representa un teórico color de luz producido por un cuerpo negro irradiando a una determinada temperatura. Es un indicador menos confiable que el anterior puesto que distintas lámparas de idéntica temperatura de color pueden tener para el ojo, apariencias claramente distintas. Sabemos que el sistema visual humano tiene gran capacidad para la discriminación comparativa, de modo que se recomienda mantener la continuidad visual con la misma fuente de luz en toda el área de exposición a menos que los que se desee sea un efecto visual específico [Miller,2005].

#### 2.2.5.b) Los sistemas de distribución.

Luego de la elección de las fuentes de luz apropiadas para la función de iluminar museos corresponde el planteamiento de diseño en el que se decide cómo llevar la luz de una fuente al objeto. Para ello se cuenta con las luminarias y en la iluminación de museos, los más frecuentemente elegidos son los de un tipo especial llamado reflectores [IES, 2011].

En la mayoría de los casos, la lámpara se ubica en el interior de un reflector. El reflector es el componente óptico más importante del conjunto, porque da forma y control al haz de luz. El

reflector puede formar parte de la lámpara o de la luminaria. La conveniencia de uno u otro tipo es parte de un debate que se desarrolla al interior de la actividad de iluminación de museos y depende de las prestaciones que ofrece cada variante, entre ellas merece particular atención las implicancias de cada opción en el mantenimiento, limpieza y recambio de las instalaciones [Cuttle,2007].

A favor de la opción reflector que no es parte de la luminaria se tiene que al cambiar de lámpara el equipamiento óptico permanece constante, en la medida en que su adecuada limpieza y mantenimiento lo permita. De lo anterior se deriva su principal desventaja: el gran consumo de tiempo que lleva su mantenimiento [Cuttle,2007].

En el caso del reflector como parte de la lámpara, está su capacidad de renovación total a nuevo del sistema completo de fuente y luz. Al elegirse esta opción debe considerarse la necesidad de mantener en stock una cantidad de unidades de distinta potencia para afrontar las distintas eventuales necesidades [Cuttle,2007].

#### 2.2.5.c) Lentes.

En su máxima complejidad, los lentes para exhibición serán dos o tres elementos armados para proveer patrones de iluminación específicos, en un esquema bastante similar a los usados en la iluminación de escena de los teatros [Cuttle,2007].

En el caso de los más simples, se reducen a lentes simples colocados al frente de los spots de iluminación.

- i. Lentes de escultura o ampliado (*spread lens*). Son usualmente de cristal prensado o fundido que cambian la forma del haz de luz proyectado, que lleva del círculo a una forma oval, elongada o elíptica que ayuda a iluminar mejor objetos amplios o altos, o bien sirven para crear bandas de luz que acompasan un grupo de objetos exhibidos [Cuttle,2007].
- ii. Lentes difusores. Son útiles para reducir los niveles de luz y aumentar el área cubierta de una muestra determinada. También se usan para limpiar los trazos en la superficie iluminada producidos por la reflexión del filamento de la fuente de luz [Cuttle,2007].
- iii. Filtros. Se utilizan para eliminar, los componentes de radiación visible y no visible que no se desean en la luz presente o proyectada.
- iv. Fibra óptica.

En los años recientes, los fabricantes de estos dispositivos han realizado una fuerte campaña a favor de la fibra óptica como la solución de todos los problemas de iluminación de museos. No lo son. Son sólo una herramienta más, muy útil en ciertos casos.

La fibra óptica es básicamente un dispositivo de distribución de luz, puede considerarse como un largo y delgado lente al frente de una lámpara. Lo que permite es distribuir la luz de una lámpara en un área mayor. Permite también subdividir la luz de una sola lámpara y permite localizar la lámpara a distancia de la superficie iluminada, lo que reduce al mínimo el calentamiento del objeto iluminado [Cuttle,2007].

Como se ha dicho, estas características son extremadamente útiles en la iluminación de museos donde se necesita iluminar frecuentemente con bajos niveles, en lugares reducidos y también es

un factor ventajoso su bajo mantenimiento. Para la mayoría de los museos es preferible la fibra de vidrio, que reducirá además los niveles de UV. , pero que permite el paso del infrarrojo [Cuttle,2007].

En cuanto al rendimiento de color de la lámpara, caben todas las consideraciones y requerimientos citados anteriormente para cualquier conjunto de lámparas y luminarias. La fibra de por sí no mejora el rendimiento de color, más bien tiende a potenciar el verde, efecto que se hace más patente cuanto más larga sea la fibra utilizada y esta característica ha de considerarse al momento de su empleo en la iluminación de museos [Cuttle,2007].

#### 2.2.6. Un criterio básico para iluminar salas de exhibición.

Como síntesis de una caracterización del buen cumplimiento de la función de exhibición del museo, circunscrito a la iluminación, adherimos a un criterio sintético de recomendaciones que sin agotar la cuestión, permite reunir buena parte de los aspectos hasta aquí analizados, de los componentes de la visión que deben ser tomados en cuenta al iluminar museos, para cumplir con el cometido de *presentar y ver* adecuadamente una exhibición [Miller, 2005].

- a. Iluminar objetos, antes que áreas. Esto permite manejar valores bajos de iluminación, poniendo en relieve el objeto y permitiendo que la sensibilidad de contraste del usuario a favor de una buena visión seguridad [Miller, 2005; Torres Portero, 2008].
- b. Subordinar los fondos. Complementario a lo anterior, cuanto menos luz haya en el contexto de fondo de un objeto exhibido, menor cantidad de luz será necesaria para lograr el contraste necesario para una buena visión. Como se verá en el próximo capítulo, ésta medida a su vez puede colaborar en cumplir mejor la función de preservación y conservación. [Miller, 2005].
- c. Controlar los reflejos y el deslumbramiento. Mediante la correcta elección de los ángulos de iluminación de las fuentes y la consideración del color y las texturas de los objetos exhibidos [Miller, 2005].
- d. Al tiempo que nos permitimos añadir una cuarta: Favorecer la adaptación visual. Es decir, utilizar las áreas y los recorridos, además de las categorías de los objetos exhibidos para favorecer la adaptación a los niveles de iluminación que se necesitan en un museo, especialmente para exhibir objetos delicados, o irremplazables.
- e. Y una quinta: priorizar aspectos de percepción del color, transparencias y texturas.

### 3.3. La Preservación/ Conservación.

La iluminación sea de fuente natural o artificial, permite ver y conocer el patrimonio exhibido, pero también produce efectos indeseados de deterioro del patrimonio cultural. Uno de tales efectos, que ha sido estudiado y definido, es el llamado fenómeno de la fotólisis [Thomson,2008].

El fenómeno se produce cuando las moléculas de la superficie de los objetos son excitadas por la energía absorbida y consecuentemente, no reflejada por la superficie del objeto. Energía que se presenta tanto en su manifestación como luz, pero también en su rango espectral no visible. Consecuencia de dicha excitación, las uniones entre moléculas del material sufren perturbaciones, reordenamientos y transformaciones irreversibles que resultan en el envejecimiento prematuro y eventualmente la degradación del patrimonio exhibido [Thomson, 2008].

El problema que une al fenómeno de la fotólisis con la actividad museológica es que la exhibición aumenta el riesgo de daño de los objetos. Cuanto más accesible y visible es un objeto, mayor es el riesgo de daño al que se expone [Shaw, 2010].

Para los propósitos que aquí se tratan, el riesgo de daño que se produce en un objeto de museo, es consecuencia del fenómeno de la fotólisis por acción de la radiación U.V y de la radiación visible como agentes principales, aunque se toma en cuenta el posible efecto nocivo de la radiación IR. Este último tipo de radiación no tiene suficiente energía para por sí sola generar daño pro fotólisis, pero su contribución de calor al ámbito y a los objetos iluminados la convierten en un factor potencial asociable al daño no sólo por causas de iluminación, sino también en las denominadas causas de daño por temperatura y humedad relativa incorrectas [Michalski,2009].

En efecto, las condiciones higro-térmicas que devienen del microclima configurado por el espacio y la escena de las exhibiciones museológicas son causa asociada a varios tipos de daños, entre ellos el de exposición a la radiación, ya que un rápido aumento de la temperatura en el objeto iluminado mediante la llamada *energía de activación* en forma de calor, es la que da inicio al proceso de *fading* y de consecuente deterioro foto-químico [Thomson, 2008].

Dichos fenómenos eventualmente manifestarán su incidencia en efectos visibles de deterioro *foto-químico* en el aspecto visible de las obras, piezas y artefactos exhibidos que en una primera etapa se llama decoloración (*fading*) y que de continuar su acción en el tiempo llegan a causar daño *foto-mecánico*, instancia en la que se verifican daños no superficiales, sino en la estructura misma de los objetos. [Miller, 2005; Thomson, 2008].

La luz que entra en contacto con una superficie material, se refleja o bien se absorbe. La luz reflejada luego llega a los receptores del ojo, el órgano de percepción encargado de la fase sensorial de la visión, que son el conjunto de conos y bastones que se encuentran en la retina. Luego el estímulo sensorial es conducido mediante el nervio óptico hacia un procesamiento realizado en los centros cerebrales encargados de configurar, filtrar y procesar cognitivamente la información recibida. Como resultado percibimos una determinada entidad, para nuestro caso objetos de exhibición y llamamos a ese fenómeno, visión [Thomson,2008].

La luz que no se refleja, la porción que es absorbida por el artefacto, produce cambios químicos a nivel molecular en distintas capas del objeto, primero en las más superficiales y de acuerdo al tipo de radiación, puede alcanzar las subsiguientes. Estos cambios químicos también se producen en los sensores del ojo frente al mismo estímulo, pero a diferencia del sistema perceptual -que tiene la capacidad de revertir los cambios químicos producidos por la visión y con ello la de restablecer el estado previo al estímulo- los objetos inanimados no tienen la posibilidad de restablecer la modificación que la luz absorbida ha producido en su estructura molecular [Miller, 2005].

Más precisamente, dentro de lo que llamamos el haz de luz, sus constituyentes, llamados fotones penetran en los átomos responsables tanto del color como de la estructura del objeto. En términos muy sencillos, mediante los dispositivos de iluminación – fuentes de luz artificiales – los electrones de la corriente eléctrica son convertidos en fotones que son proyectados a una velocidad de 300.000 Km/s. y giran a 1.014 revoluciones por segundo [Thomson, 2008].

La luz visible, los rayos U.V. así como los Infrarrojos penetran en las capas de los objetos, en los espacios vacíos abriéndose paso entre miles de átomos.

Los materiales “reflejantes” necesitan de un espesor superficial de 50.000 átomos y de una coherencia en su estructuración para reflejar tan sólo la mitad de la luz recibida del haz ingresante.

Aún en tal caso, sólo reflejan los fotones correspondientes a ciertos colores de luz [Thomson, 1994].

El resto de los fotones del haz de luz ingresante, continúan su curso dentro de la materia modificando, debilitando e incluso cortando las uniones que mantienen a las moléculas unidas. Al no ser reversible la modificación que la reacción química produce en los átomos se inicia un proceso de acumulación de dichas modificaciones al interior de la estructura atómica y molecular del objeto iluminado, primero imperceptible, luego a lo largo de un proceso de acumulación, visible como daño foto-químico y finalmente como daño foto-mecánico [Thomson, 2008].

De tal modo, cuanto más luz, más fotones y por consiguiente mayor riesgo de daño [Shaw, 2010]. La *ley de reciprocidad* es una ley de baja precisión, para el manejo de la preservación de los objetos exhibidos en un museo, que establece que una cantidad de luz que ilumina un objeto, producirá el mismo daño en la mitad de tiempo, que la mitad de ésta cantidad de luz en el doble de lapso de exposición. Como se ha dicho, es una ley de manejo poco precisa para la preservación de objetos. En el apartado siguiente se explica las razones por la que hoy es discutida, pero puede decirse en antelación, que en la medida en que se suprima suficientemente la presencia de radiación U.V. y la de IR. la ley de reciprocidad puede conservar gran parte de su credibilidad [Thomson, 2008].

Para facilitar la comprensión de esta parte de la misión del museo, por su importancia y complejidad, la estudiaremos en atención a otros factores contribuyentes al deterioro del material exhibido: La Iluminación, el Calor y la Humedad relativa. Asimismo, se hace mención de la calidad del aire y su grado de polución, ya que puede afectar a la preservación de lo exhibido y al confort de los usuarios del museo, pero no son parte del tema central de investigación que nos ocupa, aunque su regulación y control es parte del servicio que prestan al museo los sistemas de climatización específicos.

### 3.3.1. El daño foto- químico primario.

La oxidación de los materiales de museo por la radiación y la luz (foto-oxidación) involucra una gran variedad de reacciones químicas. Cada una de esas reacciones se produce en diferentes cadenas y ellas, por etapas. No todas esas cadenas se conocen en detalle, pero están suficientemente estudiadas las primeras etapas del proceso de daño químico, que por presentar cierta uniformidad en su desarrollo se han descrito del siguiente modo:

1. Etapa de absorción de energía, o período de inducción. Esta primera etapa, se explica por la expresión:



Donde R es una molécula orgánica, parte de una larga cadena polimérica.

Donde hv es la energía de un fotón de frecuencia v.

Donde h es la constante de Planck.

Y donde \* significa electrónicamente excitado.

2. Etapa de formación de un radical libre (R\*).
3. Etapa en la que luego de la formación de un radical libre, aumenta sensiblemente la probabilidad de su combinación con el oxígeno:



En la primera de las etapas, llamada período de inducción, la luz produce poco efecto. Por supuesto se registra una absorción de energía, pero no afecta apreciablemente el color. El elemento que carga con la mayor parte del deterioro en ésta etapa, es la propia estructura polimérica del material.

Feller ha calculado un período de inducción de 11 años, en condiciones de buena iluminación para un muro expuesto, antes de que los metacrilatos n-butyl e iso-amil comenzaran a mostrar signos apreciables de cambio de color [Feller, 1987].

En la segunda etapa, llamada etapa de daño, las impurezas que protegían inicialmente al polímero, han desaparecido degradadas por el daño en el periodo anterior. Es en éste momento en el que la foto-oxidación se acelera. En la tercera etapa, llamada de post daño, la foto-oxidación se ralentiza, pero ya en este estado, la mayoría del daño ya está hecho [Thomson, 2008].

Tales fenómenos eventualmente manifestarán su incidencia en efectos de deterioro *foto-químico* en el aspecto visible de las obras, piezas y artefactos exhibidos que en una primera acepción llamamos decoloración (*fading*) y que al perpetuarse llega al daño *foto-mecánico*, instancia en la que ya son verificables daños en la estructura de los objetos [Miller, 2006; Thomson, 2008].

Los estudios que han permitido la descripción de éstas etapas, también han permitido modificar al menos parcialmente, el criterio de preservación ante el daño foto-químico, para pasar de un enunciado de simples máximos niveles de iluminancia permitidos o recomendados, hacia un criterio que toma en cuenta la exposición de un objeto en determinadas condiciones de iluminancia a lo largo del tiempo. Es decir, se calcula el período de inducción de un determinado material, en el que la luz tiene todavía un efecto menor en el proceso de daño para utilizarlo y cabe decir, administrarlo en función de las necesidades de exhibición y de exposición [Michalski, 2007; Shaw, 2007].

El fenómeno de fotólisis, visto en relación al espectro de la radiación que entra en contacto con los objetos, revela que es inversamente proporcional al tamaño de la longitud de onda, o sea que para la iluminación, su peligrosidad es de grado decreciente en el siguiente orden: en primer término la radiación U.V., luego el rango de la luz visible y finalmente el Infrarrojo [Michalski, 2007; Thomson, 2008].

De lo anterior se deduce que es pertinente continuar con el estudio de las características espectrales de la radiación en contacto con los objetos de exhibición de museos, orientándose dichos estudios hacia la prevención y reducción de los fenómenos de deterioro del patrimonio cultural exhibido y en armonía a los otros componentes de la iluminación natural, en un enfoque metodológico que sistematice y protocolice acciones de proyecto y de diseño de iluminación en edificios destinados a museo [Michalski, 2007; Druzik, 2007].

### 2.3.2. Los protocolos y recomendaciones de preservación.

Las primeras recomendaciones para la iluminación de museos que se conocieron ampliamente, aparecieron en el ejemplar de Julio de 1930 de la revista Burlington Magazine [Druzik, 2007]. En ellas, Feller –el autor- presenta una serie de recomendaciones para los niveles de iluminación en museos, agrupados en niveles alto, medio y bajo. A lo largo de la década fueron publicadas en distintos jornales y libros. Si se hace un promedio de los valores de nivel de esas primeras recomendaciones, se obtienen 57,142 y 258 lux respectivamente para cada uno de los tipos de nivel de iluminación [Feller, 1964].

Dichos niveles son muy aproximados a las primeras recomendaciones de niveles de iluminación para museos que Thomson, publicara en el libro *Studies in Conservation* [Thomson,1961] y que luego serían refinadas en su libro *The Museum Environment* originalmente publicado en 1978 en el que se establece un rango de niveles de iluminación desde los 50 a los 200 lux.

Entre los autores de esas tempranas etapas de investigación y publicación de medidas de protección y conservación para objetos de exhibición, merece la pena mencionarse a Lauren, McLaren, Hanlan, Harrison, Padfield, Feller y Ruth Johnston-Feller. Es en este período -a mediados de los años setenta-que se determinan los efectos de la radiación UV. sobre los colores fugitivos y los permanentes, además de establecerse los estándares industriales de pérdida de color(*fading*) [Druzik, 2007]. Es también en éste período que se inician las investigaciones acerca de daño mecánico, aquel que se produce por continuidad del daño foto-químico o por acción de deterioro causado por la temperatura, la humedad relativa, acción bacteriológica y otros que afectan a la estructura misma del objeto de exhibición.

Son especialmente destacables los trabajos de Padfield y Landi al haber provisto a la comunidad científica del enfoque general que todavía se utiliza en el planteo de modelos de evaluación de riesgo en la actualidad [Druzik,2007].

En las siguientes décadas de los ochenta y noventa, Garry Thomson en Inglaterra y Robert Feller en los EE.UU. se presentan como las voces más autorizadas en el ámbito y temática del control de daño de objetos de exhibición causado por la iluminación, el primero por su aporte en *The Museum Environment* [Thomson, 1978] que se considera como la primera de las publicaciones de conservación en ofrecer un enfoque ambiental completo, el segundo por su enfoque laboratorial en un intento de fundar la ciencia de conservación mediante bases de investigación bien definidas para la industria de la pintura y los textiles [Whitmore,2002; Druzik, 2008].

Todos los antecedentes citados previamente son destacables en el ámbito de la Iluminación de Museos, como intentos de hacer de la conservación una ciencia capaz de aportar información confiable para uso de los conservadores e iluminadores. Vale señalar también que en los albores de la actividad museológica, en fecha tan lejana como es 1844, ya se había publicado un manual de técnicas ambientales para edificios del autor David B. Reid .Su trabajo era conocido por Sir Charles Eastlake, a cargo en aquel entonces de la National Gallery de Londres, Inglaterra y sin embargo no fue tomado en cuenta ni usado para mejorar las condiciones ambientales de la citada galería, que a ojos de los estándares hoy presentaba un panorama deleznable. Es decir que además del trabajo de investigación, es necesario un enfoque metodológico y comunicacional que haga de los protocolos y los modelos a emplear, asequibles e incluso amigables para la comunidad de curadores y administradores de éstas complejas instituciones que son hoy en día los museos [Druzik,2007].

Desde los años ochenta en adelante, un énfasis mayor se ha puesto en examinar la totalidad de los elementos de la Iluminación de museos [Michalski,1987,1990,1994] incluyendo en ellos la practicidad de los métodos a implementar [Ashley-Smith, 1999] y se consolida la tendencia a incluir otros factores ambientales, especialmente importantes en éste caso, la Temperatura y la Humedad Relativa [Saunders y Kirby, 2002] en las consideraciones de evaluación y preservación de daño de objetos [Druzik,2007].

En este nuevo contexto, el enfoque de la evaluación y la administración de riesgo de daño por radiación en objetos incluye en ocasiones todavía excepcionales, la posibilidad de transgredir las normas y reglas por necesidades racionalmente explicables, en tanto se garantice un monitoreo y

una documentación apropiados para el adecuado control de las exhibiciones, especialmente las de largo plazo [Druzik,2007].

El propio Michalski habla en su libro *Summary of issues in exhibit lighting* de la necesidad de “*resoluciones para situaciones específicas*” en las que se toma en cuenta una multiplicidad de factores entre los que se cuentan la sensibilidad del objeto, pero también la visibilidad del objeto, lámparas, el tipo de salones, el confort y reacciones del usuario a cada uno de éstos factores e incluso eventualmente la característica particular de la misión del museo [Michalski, 2007].

Es decir, el escenario actual de la iluminación de museos en su aspecto de conservación, no se satisface con simplemente una serie de normativas de nivel que deben cumplirse estrictamente y en todos los casos como garantía de acción de conservación.

Se estima necesario establecer protocolos que consideren la totalidad de los factores ambientales del museo y permitan así, un tratamiento inteligente y flexible a cada caso para proveer un adecuado ámbito de conservación de la obra de arte.

Sin embargo, cuando se revisa la normativa de diferentes países, entre ellas sólo se registra el caso del Instituto de Conservación Canadiense [CCI,1997] en que se permite niveles más altos que los establecidos como máximos de iluminación recomendados según la calificación de sensibilidad previamente dada a un objeto, por razones de mejorar la visión de los usuarios. Estos casos incluyen objetos que por situaciones específicas como ser: la presencia de detalles de insuficiente contraste, o estar compuestos por superficies muy oscuras, o bien porque su presentación requiere de algún tipo de búsqueda visual que lo justifica [Michalski,1997; Druzik,2007].

En esos casos excepcionales, se permite unos valores de Iluminación de hasta tres veces el máximo establecido para objetos altamente sensibles (50 lux) si se prevé en compensación, el suficiente tiempo de oscuridad para esos mismos objetos de exhibición, de modo de respetar el límite anual de exposición a la radiación [Michalski,1997].

Son también importantes los desarrollos y aplicaciones de técnicas de medición y valoración de estado de conservación de obras de arte que utilizan laser, tal el caso de la interferometría holográfica. En ellos se utiliza una fuente luminosa de alta potencia para producir un cambio en la temperatura del objeto que den lugar unos procesos de interferencia de la luz láser, en los que se basa la técnica de valuación [Vincitorio, 2010].

La técnica de interferometría holográfica ha sido depurada de modo de acotar el área de excitación, lo que constituye su principal debilidad, por ser la excitación térmica una de las causas que desencadenan el proceso de daño foto-químico y mantiene sus beneficios en la precisión de diagnóstico [Thomson, 2008; Vincitorio, 2010].

En suma, la evolución del enfoque de conservación y de las normativas de protección de objetos de museos ante el daño por radiación, indica que el de valores máximos no es de ninguna manera un criterio que permita un enfoque suficientemente comprensivo de la conservación y progresivamente, ha sido complementado por un criterio de tiempo de exposición anual estableciendo la cantidad de horas de radiación visible anual que un objeto puede recibir.

Dichos valores se consideran imprescindibles de respetar en cualquier protocolo de preservación de objetos de museos [Thomson, 2008].

**RECOMENDACIONES DE LÍMITES DE EXPOSICIÓN ANUAL PARA OBJETOS DE EXPOSICIÓN EN MUSEOS. SUMARIO**

ORGANIZACIÓN	CATEGORÍA DE SENSIBILIDAD AL DAÑO POR RADIACIÓN		
	Baja (Klxh/y)	Moderada (Klxh/y)	Alta (Klxh/y)
Illuminating Engineering Society of North América (IESNA)	Variable	480	50
HeritageCollections Council, Australia.	-	507-650	127-200
Canadian Conservation Institute.	-	1000 (ISO 4)*	100 (ISO 2)
Commission Internationale de l'Éclairage.	600	150	15

\* Valores basados en estándares de decoloración establecidos por la International Standard Organization (ISO)

**TABLA 2.1 Exposición Total anualizada .Fuente: del Hoyo Melendez et al, 2008.**

Uno de los beneficios que se extrae del conjunto de estudios que la ciencia de la Iluminación y de la preservación-conservación ha llevado adelante es el de tener una idea muy ajustada de la composición espectral de las fuentes, por una parte y una clasificación de la vulnerabilidad de los materiales a ser exhibidos. Sin embargo, todavía permanece como una debilidad en los estudios que han originado tales clasificaciones, el hecho de haberse realizado con muestras frescas y nuevas, que tienen un tiempo de fuga y deterioro menor que las muestras más antiguas y reales que se exponen, que han estabilizado su color y presentan menos deterioro que aquellas de las muestras [Druzik,2007].

También lo es la carencia de un criterio de evaluación de daño ampliamente consensuado, que permita mediante la medición correspondiente, saber si un objeto que ha sido exhibido con arreglo a los límites de exposición anual, puede seguir siendo exhibido al haber verificado un cambio de color que justifique tal decisión. No está claro aún cuál es el punto cero de deterioro – si tal cosa es posible de definir- y ciertamente no será el mismo en la consideración de una obra de pintura o grabado del renacimiento, que el de una pintura de arte contemporáneo de antigüedad menor a cinco años [Michalski,1997; Druzik,2007].

Lo antedicho, en ocasiones acentúa la tendencia conservadora de los criterios de administración de los riesgos de exhibición, lo que puede apuntarse como una característica beneficiosa ya que el desfase se produce hacia la zona de seguridad. Sin embargo esta pérdida de fidelidad en cualquier ciencia que se precie de tal es un aspecto a ser reducido, de modo que las decisiones que se tomen en conservación provengan de una base de información tan precisa y verificable como sea posible [Druzik,2007].

2.3.3. Los Protocolos de Preservación y las otras dos funciones del museo: la presentación y la eficiencia.

Los problemas de la preservación-conservación de objetos de exhibición en museos suelen ser listados como prioritarios en toda publicación relacionada a la Iluminación de museos y esto se explica por la necesidad de supervivencia del propio objeto de exhibición. Existe tanto un concepto de equidad y uno de sostenibilidad implícitos en ello: es la manera en que la generación actual de iluminadores, conservadores y museólogos hace su mejor esfuerzo para que las futuras generaciones tengan la ocasión de conocer y disfrutar del patrimonio cultural de la sociedad y de su legado.

Pero sin duda, existen los otros factores que componen la misión del museo y la completan, esto son la Exhibición y la Eficiencia [Miller, 2005], que en interacción y armonía constituyen la visión más actual de sostenibilidad en la que se enmarca la actividad museológica [Druzik,2007; Michalski,2007].

Posiblemente, una de las dificultades con las que se tropieza en la actualidad, es la de contar con unos estándares comunes para el cumplimiento de la misión del museo, incluso de alcance global, de acceso fácil y actualizado para todos los miembros de la comunidad de iluminadores, conservadores y museólogos [Druzik,2007 ; Michalski,2007].

En esa dirección el propio Michalski ha hecho pública la convocatoria de reunir y combinar toda la información de Iluminación museística junto a los nuevos hallazgos en una renovada y más sensata heurística que acerque un refundado “*modelo de evaluación de riesgo*” y que use como vehículo de comunicación a Internet [Michalski, 2007]. Al debatir en principio favorablemente la idea propuesta Druzik propone incluir entre los temas que la deberían estar contenidos en la eventual *Wikipedia museística* una serie de cuatro puntos: El primero de ellos, una mejor comprensión, conocimiento y uso de las métricas de reproducción de color; en segundo término las respuestas y desempeño de las nuevas tecnologías que se vienen desarrollando al abrigo de las políticas de conservación de energía internacionales; en tercer lugar la adquisición de el mayor número posible de data de daño de objetos, con énfasis en la sensibilidad al daño, entre otros datos de protección anóxica y finalmente en cuarto lugar, protocolos consensuados de evaluación de la respuesta humana, entre ellos incluidos los puramente estéticos y los de rendimiento visual [Druzik,2007].

El aspecto exhibición de la misión del museo es tan importante como el de preservación ya que si este último aporta la equidad inter-generacional, el modo en que el legado cultural puede ser apreciado por muchas generaciones, proveer calidad en las condiciones ambientales con las que los actuales usuarios tienen acceso a ése patrimonio cultural, habla de la equidad hacia los contemporáneos. Si una obra está mal iluminada, o no puede ser apreciada cabalmente por dificultades en el rendimiento visual de los usuarios - que en condiciones de bajo y muy bajo nivel de iluminación como los que establece toda normativa de preservación, puede resultar especialmente exigido- entonces nos encontramos con un detrimento del cumplimiento de la misión misma del museo. [Druzik,2007; Miller,2005]

La apariencia de un objeto resulta de la interacción de sus propiedades de reflexión y refracción de sus superficies, de la distribución espectral de la fuente de luz que lo ilumina y de la respuesta del sistema visual humano [Berns et al, 2000]. Es frecuente que fenómenos como la adaptación visual y cromática se den por asumidos, algo que no necesariamente ocurre en la realidad si se tiene en cuenta que la población que acude a los museos de Europa y EE.UU. es en un 55% mayor de cincuenta años [Miller, 2005]. En tal caso, estamos en presencia de usuarios dotados de un sistema visual cuyo desempeño ha disminuido en cantidad y calidad.

El caso de la reproducción de color y el índice que mide el desempeño de las fuentes de luz (CRI), establecido por la Comisión Internacional de Iluminación [CIE, 2004] también se encuentran en proceso de revisión y completamiento, al tiempo en que ingresan los nuevos desarrollos destinados a reemplazar la incandescencia como fuente de iluminación. Este tipo de fuente de iluminación, en su versión mejorada mediante halogenuros, sigue siendo el más ampliamente usado en museos, precisamente por ser el tipo de fuentes que mejor desempeño en la reproducción de color ofrece y el que se toma como referencia para las muy pocas alternativas de fuentes de iluminación con que se cuenta en la iluminación museística.

En relación al índice, ha sido configurado en base a la percepción de ocho colores de igual textura y iluminados con una determinada fuente de característica espectral, en comparación con la percepción de ese mismo grupo de colores iluminados por el iluminante de referencia de la misma temperatura de color. Algunos autores han señalado como deseable y necesario complementar al I.R.C. de modo que incluya la respuesta del observador en su interacción con las diferentes reflectancias de distintos objetos [Druzik, 2007], de modo de disponer de mayor cantidad de data perceptual que incluya la experiencia del usuario en relación a este aspecto tan caro a la presentación [Druzik, 2007; Maciel Linhares et al., 2010]

El índice tampoco permite la comparación directa entre fuentes de luz distintas. En el caso de las fuentes de LED (*Light Emitting Diodes*) esto ha hecho que se los considere defectuosos o bien inversamente, virtuosos en su capacidad de reproducción de color, cuando en realidad no se tiene todavía un índice que permita hacer aseveraciones de ese tipo con base documentada [Druzik,2007; Assaf,2010].

También es necesario apuntar para el caso de las fuentes de LED, que un aspecto de la preservación que aumentado en importancia es la consideración del daño asociado a la característica espectral de la fuente. Las fuentes de espectro discontinuo, tal es el caso de los LED, al ser comparadas con iluminantes de cuerpo negro que tienen un espectro continuo, a iguales luminosidades muy frecuentemente presentan picos espectrales de energía que superan los del iluminante de cuerpo negro. Dicho fenómeno también se produce en lámparas fluorescentes con un alto IRC usadas en la iluminación museística, especialmente para la iluminación de base. Si tales picos espectrales de energía coinciden con la longitud de onda más dañosa para un colorante, se debe esperar una aceleración del proceso de decoloración (*fading*) [Dirk, 2007].

Queda de este modo, planteado un buen ejemplo de lo que la ciencia de la conservación puede aportar a los conservadores y museólogos. El reemplazo de las lámparas incandescentes por nuevas tecnologías como fuentes basadas en LED y otras, traen aparejadas nuevas preguntas como las quedan presentadas en el párrafo anterior. Es deseable que estas preguntas sean formuladas y respondidas mediante modelos de evaluación de riesgo informados científicamente, antes que por el conocimiento empírico [Druzik,2007].

En tal sentido es que son importantes los estudios que intentan reducir la incertidumbre en procesos de decoloración y otros cambios de color mediante el uso de instrumentos como el microfotómetro, invención de Whitmore [Whitmore,1999]. También está el caso de una versión más avanzada del mismo tipo de artefacto que se encuentra en desarrollo en Tate de Londres por Andrew Lerwill [Townsend et al.,2007] que permite la identificación de pigmentos, selectividad de bandas, y da un estimado de decoloración proveyendo información basada en evidencia para evaluar el riesgo de decoloración de obras a ser exhibidas. En la misma familia de aportes, cabe listar el desarrollo de sistemas multi-espectrales que permiten mediante regresiones matemáticas y la aplicación de algoritmos matemáticos, determinar el perfil de reflectancia en la zona del U.V. e infrarrojo cercano de una amplia serie de materiales [Vilaseca, et al.,2006]. También es significativo un procedimiento similar desarrollado en el rango de lo visible para la caracterización espectral de patrones complejos de color, como es el iris humano [Vilaseca et al., 2008]. Ofrece la ventaja potencial de prescindir del uso de foto-espectrofotómetro y utilizar el perfil de reflectancia espectral calculado de una imagen tomada por cámara CCD, de un material dado, en tanto se complete la interpretación de dichos perfiles en un método de pronóstico de cambio de color [Vilaseca et al., 2008].

En esta línea de investigación, debe destacarse los proyectos VASARI (Visual Arts System for Archiving and Retrieval of Images), CRISATEL (Conservation Restoration Innovation System for Image capture and Digital Archiving to Enhance Training Education and Lifelong Learning), MARC (Methodology for Art Reproduction in Colour) se desarrollaron como proyectos pioneros fundados por la Comisión Europea, que hicieron uso de sistemas multi-espectrales para la captura de imágenes y firmas espectrales usadas en el monitoreo de pinturas con fines de estudio y conservación, lo que permite en principio disponer de una base de datos de firmas espectrales de una parte de una parte significativa del patrimonio pictórico del mundo [Martinez,1991; Hardeberg, 1999; Hardeberg;2001;Martinez et al.2002; Ribes et Al.,2005].

#### **2.4. La Eficiencia.**

El aspecto de la eficiencia en los museos es amplio y un recorrido por el estado de los estudios que lo describe, lo analizan y categorizan comienza por la mención de las políticas energéticas que en escala global se promueven e implementan y que han llevado a la prohibición de fabricación y venta en Europa en los años presentes, EEUU, Europa y Sudamérica, debido a su baja eficiencia energética y su política de producción que ha sido señalada por prácticas de obsolescencia programada [El Mundo, 2011].

Fuera de las polémicas en torno a ésta última cuestión, la supresión de la lámpara de incandescencia y en el subsecuente tramo en el que también se hará lo mismo con las fuentes de incandescencia mejorada, tal el caso de las lámparas halógenas (HD) implican para el campo de la iluminación de museos la supresión de la fuente de más extendido uso en la actualidad [Thomson,2008].

La eficiencia es el aspecto de la misión del museo en el que se prioriza el uso eficiente y efectivo, en el sentido más amplio del término, de los recursos patrimoniales, administrativos, de equipamiento, de personal y en suma, de toda índole. [Miller, 2005].

La eficiencia energética con relación a la carga o demanda energética para fines de iluminación es sólo una parte de la eficiencia energética de los edificios en general. En el caso de los museos, su importancia en proporción a la demanda energética total es menor que en edificios de otra función y tipo, debido a la necesidad de climatización durante las 24 hs. durante 360 días al año, que se precisa en los ámbitos del museo para fines de preservación, al prevenir estados de temperatura incorrecta y de cambio brusco de temperatura [Michalski, 2007].

En la actividad de iluminación de museos la eficiencia energética de la iluminación se conjuga con las necesidades de preservación y al momento de responder a la pregunta de cómo mejorar dicha eficiencia, la tendencia en los autores es considerar como factor clave a los mecanismos de control de Iluminación [Shaw,2008], ya que una luz que puede apagarse o dimerizarse, usa una cantidad relativamente baja de energía y causa una degradación mínima al objeto, al iluminarlo sólo cuando es visto. Dicha tendencia incluye considerar también la aplicación de sistemas de control presencial que detecten a los usuarios y administren la iluminación de acuerdo al flujo de personas que recorren los ámbitos del museo.

Complementariamente, se ha establecido una práctica creciente en la comunidad de iluminadores de museos, del diseño e instalación de cajas y dispositivos que albergan pinturas en su interior y que se iluminan mediante el pulsado de un mando por parte del usuario para ver la obra, que una vez exhibida se oscurece nuevamente [Shaw,2008].

En todos los casos de control de iluminación, tanto los sistemas como los artefactos son de alto costo y ello establece restricciones en su aplicación, a pesar de que el avance tecnológico y la generalización de su uso tienden a reducir gradualmente este factor. De modo que es necesario que los mismos términos de eficiencia energética que promueven su uso, se apliquen al diseño de las exhibiciones, secuenciando los criterios de de iluminación en tanto propuesta de recorrido [Shaw, 2008].

#### 2.4.1. La iluminación natural en el museo.

En el campo de la iluminación de edificios, un tema central del planteamiento ambiental de la iluminación de edificios, ha sido en las últimas décadas el desarrollo de múltiples estrategias tendientes al retorno del empleo de la radiación visible, llamada luz natural en la iluminación de los espacios habitables, en función de la disponibilidad del recurso en el lugar de emplazamiento, lo que está determinado entre otros, por la latitud geográfica del sitio [Serra,1995; Pattini,2007].

Lo anterior no se detiene en la iluminación de los edificios, sino que aspira al uso integral de la radiación disponible en la interacción con el edificio para procurar su equilibrio térmico y permita mínimos requerimientos de uso energético por vías artificiales, mejorando sus rendimientos de consumo al alcanzar con menores cantidades de energía, mayor cantidad de horas de confort ambiental. Lo antedicho pertenece en realidad, al más genuino y verdadero sentido del diseño arquitectónico desde siempre y las consideraciones en tal dirección ha sido sistematizadas desde tiempos de la antigua Roma, en tratados varios, el más célebre de todos, el de Vitrubio, probablemente escrito entre los años 23 a 27 A.C. [Serra, 1995].

La disponibilidad de la bombilla eléctrica (Edison, 1879) y la disponibilidad de una cuantiosa reserva energética de origen fósil ha llevado en el diseño arquitectónico a la pérdida de prácticas esenciales para el buen uso de la luz natural, que además de estar disponible a costo cero, proporciona en su amplio rango espectral otros beneficios a la salud humana entre los que pueden listarse la acción bactericida y en interacción con el organismo humano, todo un conjunto de efectos positivos para la salud [Serra,1995; Pattini,2007].

Se han desarrollado una multiplicidad de estudios acerca de la iluminación natural en edificios. Han sido explorado los efectos de la iluminación natural en el confort visual y en el confort térmico de los edificios, se ha experimentado con la envolvente de los edificios, sea en los cerramientos horizontales y verticales, [Chang 2006; Den Helder,2008.]o bien, en los cerramientos fijos y móviles [Pattini, 2007; Nottoli 2005]. También se ha trabajado en el control de los sistemas de iluminación en distinto grado de integración con la iluminación natural [Den Helder,2009.] y en su interacción con la conducta humana [Llaneza; 2006.]. Cabe mencionar también, la formulación de metodologías lumínico- térmicas que exploran y producen instrumentos de diseño y modelización de la iluminación natural en edificios. [Ajmat, 2008; Negrete et al.,2008.]

Ahora bien, la aplicación de estas estrategias en el campo de la iluminación de museos ha necesitado de adaptaciones especiales del criterio para su aplicación en función de los distintos espacios del museo. Se propone un diferenciado enfoque y tratamiento para cada ambiente, que se discrimina en por lo menos dos tipos: el espacio de exhibición propiamente dicho y los espacios complementarios. Para los segundos, caben las mismas consideraciones que para el resto de los edificios en cuanto a la posibilidad y necesidad de emplear el recurso natural tan intensamente como corresponda a la disponibilidad del recurso en previsión de confort visual y térmico que se precisan para su uso [Beltran,2003]

Para el caso de los salones de exhibición, las necesidades de preservación han llevado a impedir mediante el control de iluminación, cualquier ingreso directo de radiación al ámbito de exposición al tiempo de reducir los usualmente altos niveles de iluminancia de la luz natural. El criterio de restricción y control de la iluminación natural llega incluso a la recomendación de suprimir totalmente su empleo en la iluminación de objetos calificados como de Categoría 4 [CIE,2004], o *“altamente sensibles al daño foto-químico”*. En esta última categoría se encuentran las fibras naturales, el papel, los fotogramas y cintas de vídeo; en el campo de la pintura, la técnica de la acuarela y los grabados. Las razones para esta restricción son sus altos niveles de iluminación y la dificultad de control de la iluminación natural, que se agudiza a niveles tan bajos de iluminación como los establecidos como máximos permitidos para esta categoría (20 -50 lux) [Thomson, 2008].

Por otra parte, la temperatura de color de la luz natural en condiciones de los niveles máximos de iluminancia permitidos para la categoría de objetos altamente sensibles al daño por radiación produce una atmósfera azulada y su efecto en la percepción del usuario se ha descrito como anodino y frío. Los objetos de las restantes categorías de objetos según su sensibilidad al daño por radiación, son posibles de iluminar con fuente natural, guardando en todos los casos las previsiones de filtrado previo de la radiación no visible, especialmente la ultravioleta. Asimismo, asegurando los necesarios métodos automatizados de control de niveles de iluminancia [Thomson, 2008].

El balance final entre la reducción de la demanda energética para iluminación y el aumento de la demanda de energía necesaria para el mantenimiento de los sistemas automatizados, en la mayoría de los casos de edificios de función distinta a la de museos suele resolverse favorablemente, salvo en los casos en los que el recurso es extremadamente escaso [Ajmat, 2008]. Aún en los casos en que la latitud de un emplazamiento lleva a una escasez de luz natural, la inclusión de luz natural en los ambientes tiene efectos positivos en la reducción de la demanda energética total, porque aunque no sea suficiente en cantidad y horas para cubrir las necesidades de iluminación, puede traer beneficios adicionales por su efecto de calentamiento al reducir las necesidades de calefacción [Ajmat, 2008].

A diferencia de edificios de otra función, los destinados a museos en ocasiones pueden recibir la luz natural en medios y latitudes donde el recurso es escaso, con relativa menor dificultad que en aquellos casos en los que el recurso es abundante. Como se ha explicado, la dificultad y el desafío en el diseño de iluminación natural en un museo consiste en mantener valores relativamente bajos de iluminación y en presencia de un recurso abundante, esto implica extremar las medidas de control y reducción de la radiación presente en el ámbito de exposición [Del hoyo Meléndez, 2010].

La utilización de iluminación natural en edificios y particularmente en los destinados a museo, necesita en primer lugar que se determine su disponibilidad. La disponibilidad del recurso siempre surge de la interacción de la fuente natural con el ambiente y el edificio propiamente dicho, por ello la posibilidad de diseñar el edificio de cero es la circunstancia menos frecuente. Lo esperable es que la disponibilidad anual sea para un edificio destinado a la función de museo [Del hoyo Meléndez, 2010].

En este punto aparece la cuestión de definir dicha disponibilidad por medio de métodos de medición o de modelación. Ambos métodos frecuentemente se combinan en función de las circunstancias y objetivos que persigue un estudio. En la literatura encontramos estrategias de acción que procuran la medición continua durante todo el año e incluso durante varios años, con la finalidad de confeccionar una muy precisa base de datos a lo largo del tiempo, que además de

mostrar las variaciones estacionales, permiten determinar en el plano del edificio, las zonas y sub-zonas que quedan configuradas por la interacción de la fuente, el ambiente y el espacio construido [Del hoyo Meléndez,2010].

Otras estrategias intentan combinar los beneficios de anticipación que se obtienen de la modelación con mediciones acotadas que permiten evaluar la distorsión presente en los modelos matemáticos empleados en las modelaciones, de modo de corregir dichas predicciones y así contar con métodos de predicción altamente confiables [Yang et al., 2001; Chow,2004; Thanachareonkit et al., 2007]. Como se ha dicho, ambos métodos no se excluyen sino que se complementan. El método de mediciones continuas es claramente más preciso, pero por sus necesidades de implementación, sumadas a la inversión de tiempo y gestión que representan, lo hacen un método mucho menos frecuente en su uso.

El otro aspecto asociado a la iluminación natural en museos, una vez que se ha establecido la disponibilidad de radiación para diseñar la iluminación, es lograr el necesario y cuidadoso control de la iluminación, que es una tarea compleja. El control de la iluminación natural se realiza mediante los cerramientos del propio edificio y la dificultad recae en conciliar una fuente dinámica como es la natural, con elementos rígidos o de relativamente baja movilidad, como los que constituyen típicamente a los edificios [Beltran, 2004].

La estrategia de control de la iluminación natural suele abordarse mediante la disposición de una serie de dispositivos de cerramiento, desde los más rígidos como ser aleros y elementos de cierre exterior que se complementan hacia el interior con elementos gradualmente más móviles, como son los parasoles, louvers dinámicos, vidrios filtrados intercambiables y parasoles motorizados [Beltrán, 2003; Ajmat, 2008]. En los estudios de esta metodología se emplean sistemas y programas de modelización que permiten establecer un conjunto de soluciones para las diferentes orientaciones, las distintas horas y las distintas épocas del año.

El objetivo tanto del diseño como de los estudios de iluminación interior en este estadio, es obtener y asegurar niveles de iluminancia mínima, para los edificios en general, que en el caso de los museos pasa a ser considerada como máxima, evitando siempre la presencia de la componente directa en el interior del ámbito de exposición. El resultado para el caso de los museos es una iluminación general que puede ser complementada con la iluminación artificial de acentuación, si fuese necesaria para el destaque de los objetos de presentación y naturalmente, en las horas en las que no se dispone del recurso natural [Beltran, 2003].

En el rango de opiniones formadas que el tratamiento de la luz natural tiene en su aplicación para la iluminación de museos hay lugar para el disenso, incluso se encuentran enfoques diametralmente opuestos.

Así es que para una de las voces más autorizadas de la literatura científica del ambiente museístico, Garry Thomson, la iluminación natural recibe contundentes objeciones por su dificultad de administración y manejo de los elementos de control, cierre y tamizado, pero también por la temperatura de color que presenta en los niveles máximos de iluminación exigidos por las normativas de preservación de los objetos más sensibles al daño. De acuerdo a su criterio, el balance final no compensa con el ahorro energético que aporta, los beneficios que dejan de obtenerse mediante una iluminación más controlada, en el conjunto del cumplimiento de la misión del museo [Thomson, 2008].

No obstante, autores como J.F. Ezrati del Museo del Louvre en París, Francia, valoran de modo completamente opuesto los mismos aspectos. Ezrati elige la luz del norte –la luz que viene

primordialmente reflejada por la bóveda celeste en la mitad recesiva y complementaria del arco solar en el hemisferio norte - para iluminar las salas de exhibición. La razón para ello es evitar completamente la radiación directa, a pesar del hecho que la luz proveniente del sector norte de la bóveda celeste en el hemisferio norte, como se concede en el propio estudio, tiene un alto componente de radiación ultravioleta. La ultravioleta es considerada la más dañosa de las radiaciones para los objetos de exhibición, lo que autor resuelve mediante la aplicación de filtros en los cristales de captación y aplica en el dimensionado de la iluminación interior, el tradicional método de factor luz día (*daylight factor*). Los valores que interesa verificar en un caso como el que se describe, son los de exposición anual, los que según el propio autor, resultan verificados en cálculo y en mediciones realizadas, arrojando en el resultado final una cifra de exposición anual del cincuenta por ciento de lo permitido por la normativa. Por supuesto, se destaca que una vez bajo control los elementos de riesgo de daño, se disfruta de la inmejorable reproducción del color de la fuente natural, con el consecuente beneficio de la función de presentación [Ezrati,2008].

En los tiempos actuales, la eficiencia energética de cualquier sistema de Iluminación que rinde sus beneficios a mediano y largo plazo, comparte prioridades con las otras demandas energéticas y su eficiencia se considera en conjunto y en proporción, dentro de un esquema general mayor que se supone sintetiza todas las eficiencias anteriores en la lógica presupuestaria que guía la administración de los recursos del museo.

Los museos actualmente afrontan retos en su supervivencia y los sortean con distinto nivel de éxito en función del origen de sus fondos, de su situación geográfica y de su estrategia de inserción social, comunicacional y de mercadeo.

Se tiene entonces que para el caso de España, que alternativamente y por su desempeño en el año 2010 sumado a los anteriores, el Museo Chillida situado en el País Vasco, ha cerrado sus puertas desde el primer día de 2011 [Museo Chillida Leku,2010] y el Museo Guggenheim de Bilbao, situado en la misma región española reporta como informe de gestión de 2010 un incremento del 6% de visitas en el mismo ejercicio [Canal Patrimonio, 2011]. No es objeto específico de este trabajo explorar la problemática económica de los museos, pero la actualidad de estos datos y su relación con la misión de eficiencia del museo lleva a mencionar algunos de sus rasgos generales.

Son distintas las matrices de financiación que caracterizan la economía de los museos en EE.UU. y Europa. En el primer caso, si bien existen museos parcialmente financiados por el Estado, el grueso de los fondos de los museos estadounidenses provienen de fondos aportados por ciudadanos particulares mediante el pago de entradas y/o el aporte a fundaciones recaudadoras de fondos para entidades no lucrativas. También aportan a los museos mediante donaciones y préstamos de sus colecciones privadas de arte. El colectivo que los agrupa es el de mayores de 55 años y que controla el 75% de la riqueza y gasto discrecional en ese país [Miller, 2005].

El caso europeo presenta un panorama bien distinto, en el que la presencia de presupuestos estatales es significativamente mayor que en el estadounidense en términos generales, lo que en principio les permite una mayor capacidad de supervivencia a la lógica de mercado, pero los hace más vulnerables a los procesos de crisis de los mismos Estados que los sostienen.

En el apartado de los costos fijos que son producto de las cargas y obligaciones impuestas por la misión de los museos, ambas orillas del hemisferio occidental comparten una casi composición parecida. El museo debe mantener ámbitos y estructura burocrática y presupuestaria para el almacenamiento y sobre todo para la exhibición de su patrimonio sumado al que recibe en

préstamo, lo que implica mantener ámbitos climatizados todo el año, en horas en las que se exhiben y en las que no, debido al riesgo de daño en objetos que pueden causar tanto una temperatura incorrecta, como los cambios bruscos de temperatura en el ámbito de exposición. Recurrentemente el aspecto de la preservación impacta al de la eficiencia y es frecuente la literatura que su tratamiento se haga en conjunto o que el primero subordine completamente al segundo [Miller, 2005 ; Michalski, 2007].

Para facilitar la comprensión de esta parte de la misión del museo, por su importancia y complejidad, la estudiaremos en atención a los factores contribuyentes al deterioro del material exhibido: La Iluminación, el Calor y la Humedad relativa. Asimismo, se hace mención de la calidad del aire y su grado de polución, ya que puede afectar a la preservación de lo exhibido y al confort de los usuarios del museo, pero no son parte del tema central de investigación que nos ocupa, aunque su regulación y control es parte del servicio que prestan al museo los sistemas de climatización específicos [Thomson,2008].

En relación a la Temperatura y Humedad Relativa, ha sido notado que son factores de importancia en el potencial de daño no sólo por radiación en la que tienen impacto potencial especialmente si se presentan variaciones y saltos de cantidad en cortos períodos [Thomson, 2008], o bien cuando sus valores se encuentran en las llamadas “*zonas incorrectas de Temperatura y H.R.*” [Michalski, 2009], que tanto la Temperatura y la Humedad Relativa Mantener sus valores estables y dentro del rango correcto requerido (18 a 22 °C para Temperatura y 45 a 55% de HR.) requiere del museo la inversión y uno de los costos fijos más significativos en su presupuesto. Se han desarrollado diversas metodologías de monitoreo y de medición de desempeño que permiten conocer la demanda real efectiva y el desempeño real y efectivo de los dispositivos encargados de tal función, no sólo para conocer el resultado de la interacción de ambos parámetros en el potencial daño en objeto sino como una medida de uso eficiente de los recursos del museo [Cognati et al., 2008].

#### 2.4.2. Iluminación artificial. La tecnología de fuentes basadas en LEDs.

Las lámparas llamadas LED por su abreviatura en inglés, (*light-emitting diode*) consisten en un dispositivo formado por un diodo emisor de luz. Su presentación como fuente de luz se produjo en 1962 por Holonyak, quien es considerado el padre de esta tecnología tal como se la conoce hoy [Holonyak, 2004], aunque el principio de la electroluminiscencia que las hace posible había sido descubierto por el experimentador británico H.J. Round [H. J. Round 1907].

El primer LED construido se reporta en 1927 por el científico ruso Oleg Vladimirovich Losev. Los primeros LEDs emitían sólo luz roja a muy baja potencia y su aplicación se limitaba al reemplazo de las lámparas de incandescencia de distintos artefactos electrónicos de medición y en la versión de infrarrojos, en mandos remotos de artefactos electrónicos.

En 1976 T.P. Pearsal creó el primer LED de alta eficiencia y alto brillo para telecomunicaciones de fibra óptica. El desarrollo de la tecnología fue mejorando progresivamente el flujo y con ello la eficiencia de estas fuentes, hasta que la invención del LED de alto brillo lo hizo apto para iluminación [Forbes, 2008].

Paulatinamente se amplió la gama de colores disponibles, incluyendo al verde y en 1995 fue desarrollado el primer LED azul de alto brillo por Shuji Nakamura. Con ello quedó abierta la posibilidad de producir luz blanca a diferentes de perfiles espectrales de emisión, a partir de la combinación de los tres colores primarios. En ese mismo año, Barbiery de la Cardiff University

condujo estudios de eficiencia y confiabilidad de LEDs de alto brillo, que demostraron buenos resultados usando contactos hechos con láminas de óxido de indio (ITO) [Barbiery,1995].

Los LED son en general pequeños, de un área menor a 1 mm<sup>2</sup> y se integran en un componente óptico para darle dirección y forma al patrón de radiación [Moreno et al., 2008]. Entre las varias ventajas en la comparación con otras fuentes de luz, se encuentran un menor consumo energético, vida útil más larga, robustez, además de un tamaño pequeño que permite un mayor rango de ubicuidad. Lo anterior le ha valido un prestigio y una gran expectativa en el reemplazo de otras lámparas, si bien hay que hacer algunas puntualizaciones al respecto [Assaf et al., 2010].

Una primera es establecer que aún hoy, las lámparas a LEDs lo suficientemente poderosas para la iluminación de salas- salas de uso general- son todavía relativamente costosas y requieren una corriente muy precisamente regulada y una administración del régimen de calor más completa y compleja que las lámparas de descarga, como por ejemplo las fluorescentes [Assaf et al., 2010].

En el caso de la Iluminación de museos, tal desventaja competitiva se relativiza, debido a que como se establece en la abundante lectura de recomendaciones en la elección de lámparas, el factor clave no es la potencia sino el Índice de Rendimiento de Color (C.R.I) de las lámparas a usar para estas aplicaciones, lo que determina que sólo se utilicen lámparas de índice 99 para la iluminación puntual y de 95 como mínimo para la general.

En la práctica, se ha constatado mediante el relevamiento de museos de referencia, tales como Tate Gallery de Londres, El Museo de El Prado de Madrid, El Museo y Centro Cultural Reina Sofía, El Museo de Arte Contemporáneo de Barcelona, y El Museo Nacional de Arte de Cataluña, que la elección de lámparas recae en todos los casos en las de filamento Incandescente Halógenas de diámetro 110 mm para la iluminación de acento, y lámparas fluorescentes de alto índice de rendimiento de color para la iluminación de base.

La interrogante sobre la elección de lámparas para la iluminación de museos en el futuro, queda planteada entre la evolución y mejora que las lámparas fluorescentes puedan hacer en su índice de reproducción de color y el crecimiento y mejora de las tecnologías en desarrollo, en éste caso las lámparas a LEDs [Assaf et al., 2010].

Este desarrollo no ha estado acompañado por una evaluación independiente de los productos que se encuentran en el mercado. Al respecto, un estudio realizado recientemente ha incluido la evaluación integral de algunas lámparas a LED presentes en el mercado basadas dentro del etiquetado de eficiencia energética. Una selección de lámparas disponibles en el mercado de Argentina, se sometió a ensayos eléctricos y fotométricos de laboratorio. El desempeño se evaluó en los mismos aspectos que rigen para lámparas convencionales, esto es: vida, eficiencia, calidad cromática, rango de potencia, aunque no se declara entre ellos la evaluación de rendimiento de color [Assaf et al., 2010].

En este estudio hace referencia al *turning point* que la industria y la práctica de la iluminación esperan que esta tecnología lograría en los años próximos, o sea el momento en que las lámparas de tecnología LED estén en condiciones de reemplazar a las de tecnología tradicional y con ello cambie el paradigma que categoriza y rige a las lámparas. Se considera que ese momento será cuando se alcancen rendimientos de eficiencia energéticas estables y superiores a los 150 lm/ W y una vida útil de 20.000 horas [Assaf et al., 2010].

El estudio citado tiene la limitación de abarcar en su muestra a los productos que se encuentran en el mercado de la ciudad de S.M. de Tucumán en la R. Argentina. Hecha la salvedad, en cuanto a la

eficiencia energética, los resultados de las lámparas que se evaluaron, arrojan cifras muy lejanas a las declaradas por los fabricantes y exhiben un promedio de 30 lm/W, lo que las sitúa en mala posición comparada con otras alternativas, ya que en éste aspecto, con valores de eficiencia menores a 50 lm/W, aún no pueden aspirar a reemplazar a la incandescencia, ya que existen opciones de lámparas de descarga claramente superiores [Assaf et al., 2010].

En cuanto a la eficiencia energética, es ya conocida para el caso de las lámparas LED la dependencia que tiene su flujo luminoso con la temperatura que al aumentar produce una reducción del flujo y consecuentemente, de la eficiencia energética de estas fuentes. El gradiente de variación de la reducción de flujo causada por aumento de la temperatura, según pruebas de laboratorio van desde -7%/ °C a -0,25%/°C. [Huh, schaff et al,2004; Imrie et al.,2000].

La disipación de calor parece ser la limitación actual de esta tecnología para su fabricación con densidades de potencia mayores. El calor afecta principalmente a los diodos, por esta razón y a diferencia de las lámparas convencionales, las lámparas a LED de baja potencia con pocos diodos, pueden ser más eficientes que las de alta potencia, lo que se logra por sumatoria de unidades, usualmente dispuestas en una matriz [Assaf et al., 2010].

La vida útil y depreciación de estas fuentes, en principio constituyen una de las características que se presentan como las más prometedoras para el futuro y que se estima entre las 20.000 horas y las 70.000 horas. El problema radica en comprobarlo mediante un procedimiento ampliamente aceptado de evaluación, que en la actualidad aún no existe, sólo un menú de propuestas. La vida de las lámparas a LED, a diferencia de las de tecnología convencional, no está afectada por el ciclo de encendido-apagado, pero sí es de alta sensibilidad a la temperatura ambiente o a las variaciones de tensión de la corriente eléctrica [Assaf et al., 2010].

Existen propuestas para un criterio de evaluación, entre ellas la presentada por la estadounidense ASSIST (Alianza para Sistemas de Estado Sólido y Tecnologías –Lighting Research Center-Rensselaer) que promueve una prueba de 6.000 hs. en la que se evaluaría la depreciación del flujo luminoso y el cambio de color [ASSIST,2005].

En el aspecto medioambiental, las lámparas a LED emplean para su fabricación una cantidad menor de sustancias y materiales críticos que cualquier otro tipo de lámparas [Assaf et al., 2010].

Esta característica es altamente valiosa en sí y será eventualmente una de las más claras ventajas competitivas que fortalecerán a las lámparas a LED en competencia con otras fuentes de reemplazo, en la medida que se verifiquen en ensayos, otras ventajas como las anteriormente citadas [Martínez et al., 2008 ; Assaf et al., 2010]

Respecto de su influencia sobre los organismos biológicos, más particularmente en los seres humanos, las lámparas a LED son del tipo que emite haz no-coherente, por lo tanto cabe esperar que su comportamiento no sea demasiado diferente del de las convencionales. Sin embargo se están conduciendo estudios que buscan determinar de manera fehaciente que el uso de lámparas de LED no suponga peligros para la salud [Assaf et al., 2010].

Con relación a este último punto, se puntualiza una discrepancia entre la IEC y la CIE respecto de la clasificación que reciben los LEDs en relación a las pruebas de diámetro de pupila para evaluación de daño ocular y en relación a su espectro de acción. Mientras que la IEC, le otorga estándares de láser, la CIE los considera como lámparas de servicio convencional. Estas clasificaciones deberán homologarse en el futuro, basadas en estudios que lo avalen, lo que

permitirá tener un sistema de referencia más claro en torno a ésta tecnología y su influencia en la salud humana [Assaf et al., 2010].

Existe un tipo de daño a la salud, el BLH (Blue Light Hazards) en el que las lámparas de LED se presentan en una situación desventajosa en comparación a las convencionales. El BLH es un daño foto-químico no térmico de la retina y tiene un espectro de acción en el rango visible con una respuesta máxima en la región azul del espectro visual. En el caso de los humanos, dicho daño se asocia a una alta intensidad de iluminación y a prolongados períodos de exposición, lo que no es desde luego la circunstancia dada en la iluminación de museos [Bullough, 2000].

El daño potencial producido por la región azul del espectro visible de las lámparas a LED remite nuevamente a los temas de preservación-conservación de objetos ya que se incluye entre uno de los riesgos de daño por radiación visible siempre dentro de la regla de inversa proporción a la longitud de onda que es ampliamente conocida y mencionada en la literatura específica. Entonces es importante a la hora de seleccionar y elaborar el perfil espectral de una combinación de luz blanca a base de primarios monocromáticos o bien al seleccionarlo de las lámparas disponibles y por supuesto en la medición y evaluación de su efecto en los objetos de exhibición. Incluso existen recomendaciones de cortar con filtro las emisiones en las longitudes de onda del visible menores a 400, e incluso a 410 nm [Druzik,2007; Gor et al., 2010].

No debe dejarse de lado, hablando del criterio de iluminación de obras de arte, una de las grandes ventajas que aportan las lámparas de LED a la iluminación de museos. Efectivamente, uno de los defectos de iluminación mediante lámparas convencionales, que son mayoritariamente de tungsteno halógeno es que la forma circular del haz de luz, produce una iluminación que dibuja aureolas de distinto nivel de iluminación en las obras, lo que desvirtúa frecuentemente la intención inicial de los autores [Miller,2005; Druzik,2007].

Es un defecto que actualmente se corrige en gran medida mediante el uso de luminarias y lentes de dispersión y/o de corte. El criterio más preferible en la iluminación de arte, especialmente el de dos dimensiones es aquel que logra la mayor homogeneidad posible. Entonces, una tecnología como la basada en LEDs, que por su pequeño tamaño lleva a sumar lámparas montadas en longitud o área para obtener la potencia necesaria, obtiene otro punto favorable que la posicionan en un lugar privilegiado entre las opciones de reemplazo de fuentes en la iluminación de museos [Miller, 2005; Druzik, 2007; Torres Portero et al., 2008].

En relación al color de la luz que emiten, las lámparas a LED producen luz blanca mediante tres tipos de mecanismos de producción:

- Fuentes dicromáticas, aquellas que constan de un LED azul y un fósforo amarillo;
- Fuentes tri-cromáticas también llamadas RGB, que constan de tres LEDs de color rojo, verde y azul respectivamente;
- Por último las tetra-cromáticas, que incorporan además un cuarto LED color cyan.

Al hacer una clasificación de los tipos de LED existentes en función de la eficiencia energética y de la reproducción de color que los caracteriza, se reporta que los más eficientes y de peor rendimiento de color son los de tipo dicromático, mientras que los de tipo tetracromático son los que ofrecen el mejor rendimiento de color al costo de tener la peor eficiencia energética [Keppens et al., 2010].

En el estudio conducido por Keppens para la Katholieke Hogenschool Sint Lieven de Países Bajos en conjunto con la Universidad Nacional de Colombia, se evaluó la eficiencia de los LEDs de alta potencia fósforo blanco o dicromático mediante mediciones de las pérdidas que tienen en el proceso de conversión de potencia eléctrica en luz blanca en diferentes condiciones de funcionamiento [Keppens et al., 2010].

Los resultados establecen que las pérdidas de potencia en la resistencia serie interna representan entre el 10% y el 20% de la potencia de entrada y constituyen la principal causa de decremento en la eficiencia del diodo por el aumento de la corriente. También que las pérdidas cuánticas externas eran un factor dominante que se relaciona a la temperatura de color de los LEDs y son responsables del decremento de eficiencia de los diodos por el incremento de la temperatura en la unión o juntura [Keppens et al., 2010].

Es parte fundamental de la caracterización y evaluación de las fuentes de LED para su uso en la iluminación de museos, conocer su perfil espectral ya que tiene directa relación con el color de la luz y el desempeño en la reproducción del color. Al respecto es pertinente citar el estudio de Martínez, Vilaseca y otros, del Departamento de Óptica y Optometría de la Universidad Politécnica de Catalunya, en el que se analiza la distribución espectral energética y la variabilidad de color de LEDs blancos y monocromáticos.

En el estudio se analiza no sólo el contenido espectral de una serie de LEDs de distintos fabricantes -esta vez, comprendiendo una muestra suficientemente representativa de lo que se dispone actualmente en el mercado global- sino también y más específicamente, la variación del perfil espectral de las lámparas de LED relativa a la variación del ángulo de visión [Martínez et al., 2010].

El objetivo del estudio es evaluar su implementación como fuentes iluminantes para el desarrollo de sistemas multi-espectrales, sin embargo algunas de sus conclusiones son altamente pertinentes al tema que aquí se desarrolla [Martínez et al., 2010].

Se analizan los dos tipos de LED de luz blanca, el de tipo RGB que produce luz blanca por combinación de la emisión de tres distintos monocromáticos y el de tipo dicromático que lo hace mediante un LED azul o UV. más un fósforo iluminante. Se pondera la mayor eficiencia del dicromático, al que además se le atribuye preliminarmente un buen desempeño en el color de la emisión y la reproducción del color, pero se hace la salvedad de que su debilidad es una baja estabilidad y consistencia a lo largo del tiempo [Seuntjens et al., 2007 ; Martínez et al., 2010].

Las razones de la inconsistencia en el color de los LEDs, se atribuyen a variaciones en el proceso de producción, al cambio por el paso del tiempo, la temperatura y la estabilidad de la corriente de alimentación [Martínez et al., 2010].

Se intenta además evaluar si el ángulo de visión/emisión, se comporta como un factor adicional en la pérdida de potencia y en el cambio de color. Se realizaron mediciones para un rango de ángulos desde el 0° hasta el 42,3° con un salto incremental de 1,8° hasta los 10,8°. La primera de las conclusiones muestra que las mediciones y los resultantes perfiles en el grado 0° para los distintos modelos y fabricantes de LEDs blancos son tan similares que pueden ser reemplazados con uno representativo y que tal consistencia se logra simplemente con una cuidadosa administración de la corriente de alimentación [Martínez et al., 2010].

Los resultados también informan que hasta el ángulo de 10,8°, la directividad tiene un muy moderado efecto en el perfil espectral, con muy baja pérdida de potencia y cambio de color. A

partir de ése ángulo la tendencia cambia y se produce una directa relación entre el aumento del ángulo y la pérdida de potencia, sumada a una significativa caída en el rango de azul de perfil espectral, mayor proporcionalmente que en el rango de los amarillos lo que es razón del cambio de color llamado fenómeno de amarilleo [Martinez et al., 2010].

Distinto es el caso de los LED monocromáticos, que a lo largo de las mediciones demostraron una gran estabilidad del perfil espectral independientemente del ángulo de visión/emisión, exceptuado un tipo específico de LED monocromático, el de color ámbar. Se apunta adicionalmente, en relación a los LED blancos, la dificultad de hallar en el mercado, versiones con suficiente potencia energética espectral en el rango de menos de 400 nm. de emisión [Martinez et al., 2010].

En cuanto al desempeño en la reproducción de color, los investigadores efectuaron análisis de cambio de color siguiendo las directivas de CIE, ésta vez sólo para los LED de luz blanca y los resultados van en correspondencia al color de la luz y a la sensibilidad de la emisión espectral respecto del ángulo de emisión/visión. Las recomendaciones finales designan a los LEDs blancos como mejor opción en caso de ser utilizados como iluminantes en el desarrollo de sistemas multi-espectrales. Lo anterior es válido mediante un cuidadoso posicionamiento que asegure la emisión en el ángulo cero [Martinez et al., 2010].

También se recomienda la utilización de luz combinada de LEDs monocromáticos, una vez tomadas las previsiones en la selección de las bandas de emisión, ya que como ellos mismos constatan en el estudio, pueden hallarse algunos casos muy específicos de bandas que registren cambios espectrales debido al ángulo de la emisión, aunque como tendencia general, se observa una estabilidad e independencia del ángulo de emisión, ciertamente consistente [Martinez et al., 2010].

Todas las anteriores experiencias, conclusiones y recomendaciones son de valor y pertinencia a la hora de seleccionar el tipo de LEDs a emplear en un sistema de iluminación de piezas de exhibición en museos, ya que algunas de las exigencias a cumplir se encuentran parcialmente estudiadas en los distintos estudios referidos en esta sección.

#### 2.4.3. Iluminadores de Museos.

Existen estudios que han explorado la alternativa de reemplazo de fuentes de luz tradicionales por fuentes alternativas para la iluminación de museos. Una de ellas es el Proyecto y Protocolo de Iluminación de Museos elaborado por el Lighting Research Rensselaer Polytechnic Institute de Nueva York en el que se estudia una propuesta para reducir la exposición de los objetos exhibidos a la radiación sin reducir el nivel de satisfacción visual para los visitantes de museos. La estrategia incluye asimismo, un menú de recomendaciones que comprenden la eliminación de la radiación U.V. e I.R., seguida de una limitación en los niveles de iluminación y restricciones en la duración de la exposición [MLPP, 1998].

Se toma como referencia la distribución espectral de la lámpara incandescente y se propone investigar la hipótesis de si es posible alcanzar la satisfacción visual que ofrecen las fuentes incandescentes, pero con los niveles significativamente menores de irradiancia de una fuente iluminante, cuya emisión es producto de la combinación de tres bandas espectrales correspondientes al rojo, verde y azul. Se emplean pares de obras de arte idénticas como objetos a iluminar, en un montaje de dos salas de exposición de idéntica configuración. Las muestras de arte incluyen ejemplares coloridos y acromáticos. Se testearon a 16 sujetos observadores [MLPP, 1998].

Las lámparas estudiadas: tungsteno halogenado de baja (2.850 °K) e intermedia (4.200 °K) temperatura de color comparadas contra un sistema experimental de iluminación consistente en una fuente iluminante cuya emisión es producto de la combinación de 3 bandas espectrales. Las fuentes del iluminador provienen de tres lámparas también incandescentes (MR 16 20/12 BAB/FL/40) que por medio de filtros han sido previamente cortadas en tres bandas de emisión espectral: 450nm 530nm y 610 nm. La temperatura de color se había igualado al de la lámpara de tungsteno. Los resultados indicaron que la reducción de la irradiancia para la temperatura (2.850 K) fue de 41% y para la de (4.200K) fue de 31% [MLPP, 1998].

También se reporta que para los sujetos observadores, una vez preguntados por las diferencias entre las dos experiencias reportaron sólo sutiles diferencias [MLPP, 1998].

En la fundamentación del criterio de preservación empleado en el citado estudio se cuestiona la suposición de considerar a las lámparas de incandescencia como seguras en términos de irradiancia, por ser ellas muy poco emisoras de bajas longitudes de onda y en cambio puntualiza que de acuerdo a estudios realizados en pigmentos, es la característica espectral de absorción del pigmento la que determina su susceptibilidad al daño [Saunders & Kirby, 1994].

Por esta razón el daño potencial de la radiación visible provista por las fuentes alternativas debe ser comparada en términos de irradiancia a iguales iluminancias [Michalski,1987]. La puesta en práctica de dicho criterio en la implementación de un sistema de emisión de tres bandas espectrales que permitiese elaborar y combinar un perfil de emisión aproximadamente equivalente a la incandescencia mejorada, sumado al hecho de medir la percepción del usuario de los resultados de exhibición, son dos de los varios méritos destacables de este temprano estudio. En él, aún se utiliza la tecnología incandescente para la fuente de luz, a pesar de que desde 1995 se disponía de lámparas de LED de color azul, lo que hubiese permitido crear luz blanca por combinación con LEDs de otras bandas espectrales [Saunders & Kirby, 1994].

Si bien se reportan significativas reducciones de irradiancia, en condiciones de iluminancia equivalentes y de prometedores resultados en la percepción de una muestra reducida de usuarios, un aspecto que no queda resuelto en el mencionado estudio, es precisamente la validez de la equivalencia entre el perfil espectral producido por la combinación de las tres bandas espectrales y la del perfil de referencia del cuerpo negro o bien el de la lámpara de tungsteno, que es el que más se le aproxima a iguales temperaturas de color. Debido a su perfil espectral es que la lámpara de tungsteno recibe la máxima calificación entre 99 y 100 en la categorización establecida por el índice de rendimiento de color de CIE [CIE,2004].

Sin embargo, queda implícito que la sustracción de contenido espectral por medio del filtrado de corte de las tres bandas y su consecuente beneficio en la reducción de irradiancia emitida, tiene efectos en una diferencia lo suficientemente apreciable para los usuarios, aunque fuese en su momento calificada por los mismos como sutil o apenas perceptible. [MLPP, 1998]

También queda pendiente una calificación de IRC para el sistema desarrollado que cifrara o valuara dicho desfase en la reproducción de color, lo que excedía los límites de aquel desarrollo, que cubre ese aspecto sólo en su faz perceptual. Se ha hecho mención en los párrafos anteriores que aún en la actualidad, es uno de los pendientes de la ciencia de la iluminación y de la conservación, extender los alcances del índice de reproducción de color de modo que incluyan el aspecto perceptual incluidas en él las reflectancias de los objetos de exhibición e incluso de los artefactos como ser cajas de exhibición, siempre presentes en las salas de uso y de exhibición, sin

descartar otras consideraciones de índole puramente estética al considerar la observación del arte [Druzik,2007].

Más recientemente, se han realizado otras exploraciones en continuidad con la estrategia de reemplazo del perfil espectral de la lámpara incandescente por otros equivalentes. Entre otros, interesa destacar el desarrollo de un iluminador experimental para la iluminación de museos con fines de conservación desarrollado en la Universidad de Auckland, Australia en el año 2007. Por medio de una emisión de luz blanca producida por la combinación de tres bandas de emisión, se intenta alcanzar el desempeño máximo en la reproducción de color de la emisión. Se reporta en dicho estudio el uso de un foto-espectrógrafo de máscara, cuya aplicación en la práctica se logra mediante una plantilla de corte que con sus medidas, se ocupa de la selección de bandas espectrales de emisión elegidas, que luego se recombinarán en la emisión blanca del iluminante [Chambers & Cuttle.,2007].

Etapas posteriores del desarrollo del iluminador, informan que la inclusión de una cuarta banda espectral aporta pequeñas pero significativas mejoras en el perfil obtenido y en la reproducción de color [Chambers & Cuttle, 2007].

El objetivo del citado trabajo se centra en obtener una combinación óptima de cuatro bandas espectrales para una máxima eficacia luminosa, un máximo rendimiento en la reproducción de color, con un mínimo de potencia radiante emitida [Chambers & Cuttle, 2007].

El iluminador experimental todavía emplea como fuente una lámpara de Tungsteno Halogenado, por razones de la potencia necesaria para el funcionamiento del iluminador, pero el desarrollo apunta a establecer lineamientos que guiaran los siguientes estudios de continuación con lámparas a LED en la medida que la industria pudiera ir alcanzando niveles reales de rendimiento energético y de potencia mayores.

El sistema consiste en una lámpara de Tungsteno Halogenado de alta luminancia y luz blanca, cuya emisión pasa a través de dos filtros ópticos para eliminar la radiación U.V. e I.R. y luego es concentrada en la ranura de un espectrógrafo tipo *grating* de imagen de 150 mm de distancia focal. El gratinado de la plantilla estaba escalado a 600 g/mm y *cortada* a 500nm. La resolución de longitud de onda estaba espaciada a 10nm/mm en una salida de 14 mm de altura de plano focal donde se monta la plantilla [Chambers et al., 2007; Chambers & Cuttle, 2007].

La plantilla está construida en acero inoxidable cortada mediante laser y con sus medidas se encarga de proveer el corte del perfil espectral de las bandas de salida. Luego de atravesar la plantilla, la luz, ya en las bandas espectrales deseadas se concentra en la entrada de un sistema de distribución de fibra óptica, donde las bandas espectrales se recombinan para formar luz blanca.

Mediante un espectro-fotómetro de fibra óptica, se han tomado mediciones que informan que para un reflector de 410 W de Tungsteno halogenado como fuente primaria, el sistema es capaz de proveer 0.25 lm/W de luz blanca con una temperatura de color de rango intermedio de aproximadamente 4.200 °K y un adecuado Índice de Reproducción de Color del que no se consignan datos [Chambers et al., 2007].

Las características de temperatura y reproducción de color se evalúan como positivas, aunque como se ha puntualizado, no hay datos del IRC obtenido, sólo de la Temperatura de Color. La potencia de 2.5 lm/W, en cambio no alcanza los valores necesarios, estimados en el rango de 3 a 10 lm/W, pero se considera que mejoras futuras en el diseño permitirían alcanzar cuando menos

los valores más bajos del rango aceptable de potencia. Se reconoce en el estudio citado, que la eficacia del sistema depende en buena parte en contar con un sistema de distribución luminosa de fibra óptica confiable y de alta calidad [Chambers et al., 2007].

#### 2.4.4. Interacción de la luz con los otros elementos del ámbito museístico.

Trabajos como los antes citados, recurrentemente advierten sobre la importancia de un fenómeno conocido por la ciencia y práctica de la iluminación: es que la interacción de las fuentes con los elementos ópticos de perfilado y distribución condicionan los resultados de iluminación. La luz de que llega a un objeto, proveniente de un sistema de iluminación siempre es variable producto del binomio fuente- elementos ópticos.

Para dimensionar y tipificar esa relación se han realizado mediciones comparativas con distintas fuentes, lo que no es nuevo, pero que ahora se realizan en el contexto de reemplazo de fuentes tradicionales por las nuevas alternativas. Entre dichas alternativas, siempre ocupan un lugar predominante las lámparas a LED.

El estudio de mediciones comparativas de fuentes de luz, llevado adelante por Gor en el D.L.L.y V. de la Universidad Nacional de Tucumán se propone determinar apropiadamente la factibilidad de uso de las fuentes de luz para uso en la iluminación de museos a partir de conocer la emisión de la mismas e incluye las características ópticas de los materiales como ser vidrios, acrílicos y plásticos frecuentemente usados en las luminarias, vitrinas y otros elementos típicamente presente en los museos [Gor et al.,2010].

Con relación a la radiación no visible, junto a las recomendaciones de filtrado se hace mención del máximo permitido por las normativas, que en el caso de la U.V. es de 10 nW/lm para la categoría más sensible al daño. Debido a la dificultad práctica de su detección y medición, el estudio se ha decidido a tomar como límite el segundo nivel de recomendaciones de 75 nW/lm establecido para la segunda categoría de sensibilidad ante el daño por radiación de los objetos de exhibición [Gor et al.,2010].

En cuanto a la radiación I.R., se menciona un importante déficit que supone en la teoría y la práctica de la iluminación y conservación de objetos de exhibición en museos, la carencia de una normativa o incluso recomendaciones de la cantidad de radiación infrarroja permitida, que suele resolverse mediante el simple filtrado de corte [Gor et al.,2010].

El estudio se enuncia como una primera aproximación hacia un objetivo más amplio de crear una caracterización de las fuentes y su combinación con elementos ópticos para uso del iluminador de museos, que proponga indicadores prácticos y sencillos para su manejo [Gor et al.,2010].

Se elige para las mediciones los siguientes tipos de lámparas: Incandescentes comunes, Incandescentes con reflector dicroico, con y sin vidrio, incandescentes reflectoras de vidrio prensado, fluorescente compacta, descarga en mercurio a alta presión y LED blancos. Por otra parte los vidrios medidos fueron el tipo estándar- claros, esmerilados y coloreados- de espesores entre 2 a 5 mm y las láminas polarizadoras que se adhieren al vidrio. Las conclusiones son categóricas al señalar que las únicas en cumplir con las recomendaciones existentes son las lámparas a LED UV y fósforo blanco, y la de LED rojos verdes y azules (LED RGB) [Gor et al.,2010].

Con respecto a los materiales medidos, los resultados arrojan información de utilidad ya que se encontró que los materiales medidos funcionan como filtro de corte muy efectivos en el rango de

longitud de onda del UV inferior a 310nm, pero no así en el rango más próximo al visible entre los 310nm y los 400nm. De modo similar, la función de filtro de infrarrojos es efectiva para el rango igual y superior a los 1100 nm, pero no se cumple en el infrarrojo cercano de 800nm a 1100nm [Gor et al., 2010].

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGÍA DE ADQUISICIÓN DE PERFILES DE REFLECTANCIA ESPECTRAL DE OBRAS DE ARTE.

En el presente capítulo se explica el desarrollo de una parte esencial del trabajo que se ha realizado para validar la hipótesis en su primera parte, en la que se establece que es posible hallar una curva o perfil de reflectancia que sea representativo de la obra de arte. Obtener la firma espectral de una obra de arte es fundamental, porque es en base a dicha firma espectral que se ha de realizar la evaluación de los iluminantes CIE y eventualmente el diseño de la emisión espectral de fuentes que se emplearan en un sistema de iluminación de emisión regulable.

En la medida en que el perfil o firma espectral sea efectivamente representativo de una muestra, mayor validez tendrán las evaluaciones, categorizaciones y clasificaciones tanto de los iluminantes CIE como de las emisiones espectrales diseñadas para iluminar la obra de arte, en el contexto de un estudio de la calidad y contenidos espectrales de la radiación visible que se arroja sobre distintos objetos de exhibición en museos.

En septiembre de 2010, K. Shaw expresaba *"...con relación a la conservación, lleva atraso un nuevo enfoque y aproximación a la exposición de la luz, que será bienvenido cuando ocurra. Es importante comprender que no hay nivel seguro de iluminación: toda exhibición de un artefacto equivale a su degradación parcial... la investigación debe permitir el logro de reducir la energía usada... con un ratio de deterioro de los objetos, razonablemente administrado"* [Shaw, 2010].

El protocolo de preservación o conservación actualmente usado en la iluminación de museos, se basa esencialmente en el empleo combinado de dos criterios ciertamente valiosos:

En primer término la clasificación de objetos según su sensibilidad al daño por radiación de la Commission Internationale del'Éclairage.(Tabla 3.1) [CIE,2004].

CLASIFICACIÓN DE OBJETOS DE EXPOSICIÓN EN MUSEOS SEGÚN SU SENSIBILIDAD AL DAÑO (CIE).			
ORGANIZACIÓN	CATEGORÍA DE SENSIBILIDAD ANTE EL DAÑO POR RADIACIÓN		
	Baja	Moderada	Alta
Commission Internationale del'Éclairage (CIE)	Maderas, Piedras, metales.	Telas, óleos y acrílicos.	Fibras naturales, papel, acuarelas, plumas, etc.

**Tabla 3.1. Clasificación de objetos según su sensibilidad al daño por radiación.**

Adicionalmente, se adoptan las normativas y límites recomendados de exposición anual para la preservación de objetos de exposición al daño por radiación, que emiten distintas organizaciones reguladoras de la actividad de Iluminación y/o conservación. Se usan para conservar las colecciones que son propiedad de un museo, pero especialmente en la regulación de los

préstamos de colecciones entre museos. Un sumario de las recomendaciones emitidas por algunas de las principales organizaciones se consigna en la Tabla 3.2 [Del hoyo Melendez et al.,2008].

<b>RECOMENDACIONES DE LÍMITES DE EXPOSICIÓN ANUAL PARA OBJETOS DE EXPOSICIÓN EN MUSEOS. SUMARIO</b>			
<b>ORGANIZACIÓN</b>	<b>CATEGORÍA DE SENSIBILIDAD AL DAÑO POR RADIACIÓN</b>		
	<b>Baja (Klxh/y)</b>	<b>Moderada (Klxh/y)</b>	<b>Alta (Klxh/y)</b>
Illuminating Engineering Society of North América (IESNA)	Variable	480	50
Heritage Collections Council, Australia.	-	507-650	127-200
Canadian Conservation institute.	-	1000 (ISO 4)*	100 (ISO 2)
Commission Internationale del'Éclairage.	600	150	15

\* Valores basados en estándares de decoloración establecidos por la International Standard Organization (ISO)

**Tabla 3.2 . Recomendaciones de exposición anual para objetos de museo. Fuente: del Hoyo Melendez et al, 2008**

En la actividad museológica se tiene conciencia de que es inevitable cierto grado de deterioro en toda exhibición debido al fenómeno físico que lo produce, el daño fotoquímico primario [Thomson, 1994; Miller, 2005; Shaw, 2010], por lo tanto, son necesarias todas las acciones que lleven a disponer de información más precisa acerca de la sensibilidad al daño por radiación de los objetos de exhibición, y también acerca de la predicción de su comportamiento ante la luz y ante la radiación no visible.

El presente trabajo, en su título y objetivos expresamente supone el desarrollo de una Metodología de selección de iluminantes de diseño de la emisión espectral de fuentes para la presentación y la preservación de obras de arte y objetos de museos. A su vez, dicha metodología se compone de las siguientes partes:

1. Metodología de adquisición de perfiles de reflectancia espectral representativos (P.R.E.R) de obras de arte.
2. Metodología de selección de Iluminantes CIE y de diseño de la emisión espectral de fuentes para la Preservación.
3. Metodología de selección de iluminantes CIE y de diseño de la emisión espectral de fuentes para la Presentación.

En la actualidad la ciencia de la teledetección, la del procesamiento de imágenes y la del color han reunido un extenso catálogo de firmas espectrales de reflectancia tanto en el visible del espectro como en las radiaciones no visibles cercanas, de una mayoritaria porción de los materiales conocidos, incluidos los que componen las obras de arte, tales como los proyectos auspiciados por la Comisión Europea V.A.S.A.R.I. (Visual Arts System for Archiving and Retrieval of Images), C.R.I.S.A.T.E.L. (Conservation Restoration Innovation System for Image capture and Digital Archiving to Enhance Training Education and Lifelong Learning), M.A.R.C. (Methodology for Art Reproduction in Colour) [Martinez,1991; Hardeberg, 1999; Hardeberg,2001; Martinez et al.2002; Ribes et Al.,2005].

La información de perfiles espectrales disponible puede ser utilizada en sistemas como el aquí propuesto, para que en su uso en el sistema de iluminación, permita regular el nivel y el espectro

de la emisión de luz que se proyecte sobre un objeto. De lograrse esta interacción adecuadamente sistematizada entre la información ingresante desde el objeto y la radiación visible emitida, se lograría un avance significativo en el grado de precisión con el que se administra el deterioro de objetos de museo.

Dicho deterioro está en función directamente proporcional a la cantidad, e indirectamente proporcional al rango espectral de la energía que es absorbida por el material de la obra de arte, lo que provoca un cambio o perturbación molecular irreversible [Thomson, 2008].

### **3.1. Metodología de adquisición de perfiles de reflectancia representativos de una obra de arte.**

La elaboración de una metodología de adquisición de perfiles espectrales representativos de una obra de arte, implica una previa caracterización del concepto de representatividad del perfil espectral que ha guiado la búsqueda bibliográfica de sustento y la elección de la muestra sobre la que se realizaron las mediciones y los cálculos necesarios.

Se entiende que un perfil espectral es representativo de una obra de arte pictórico y/o de un objeto de exhibición, en la medida en que incluya el contenido de información espectral de las diferentes partes y/o zonas de la obra, pero atendiendo a todas las variaciones presentes en el área en estudio, de modo tal, que la información espectral de todas ellas, zonas y variaciones, participen de manera proporcionada en la integración final del perfil espectral [Araujo et al.,2010; Martínez et al.,2010; Martínez-Verdú et al., 2010; Perales et al.,2010].

Para el fin específico de caracterizar espectralmente una obra de arte pictórico, se le considera como una distribución aleatoria de color en una superficie.

El recorrido por los trabajos que han perseguido objetivos de caracterización espectral similares, lleva a la comprensión de que los factores de la medición que importan en el procesamiento de dicha caracterización son esencialmente: la cantidad de mediciones realizadas en una superficie y el grado en que relevan suficientemente la totalidad de los sectores del área en estudio, sectores que se definen como tal, en función de las variaciones y homogeneidades del área. [Araujo et al.,2010;Martínez et al.,2010; Martínez-Verdú et al., 2010; Perales et al.,2010].

En la fase de su procesamiento, importan las operaciones matemáticas que se aplican para lograr que la información obtenida desde los diferentes sectores participe de manera proporcionada en el perfil obtenido final [Araujo et al.,2010; Martínez et al.,2010; Martínez-Verdú et al., 2010; Perales et al.,2010].

Definición del objeto muestra de estudio: Reproducciones de obras de arte, impresas en cartulina blanca mate, tamaño A4. Se eligió un primer conjunto de obras de arte moderno, el cuadro “Composición en Azul, Amarillo y Rojo, 1921” de Piet Mondrian, denominado M1 y tres obras de Paul Klee, “Plancha de color QU1”, llamado M2; “Arkitekturder”, en adelante M3 y “Highway” o M4 (Fig. 2).

El criterio para la definición de la muestra, ha sido el de incluir en ella obras de arte que contengan en sí los colores primarios de impresión. Adicionalmente, que la característica de composición de las obras que integran la muestra supongan una graduación decreciente en el grado de aislamiento y homogeneidad de cada una de las áreas de color presentes en la superficie.

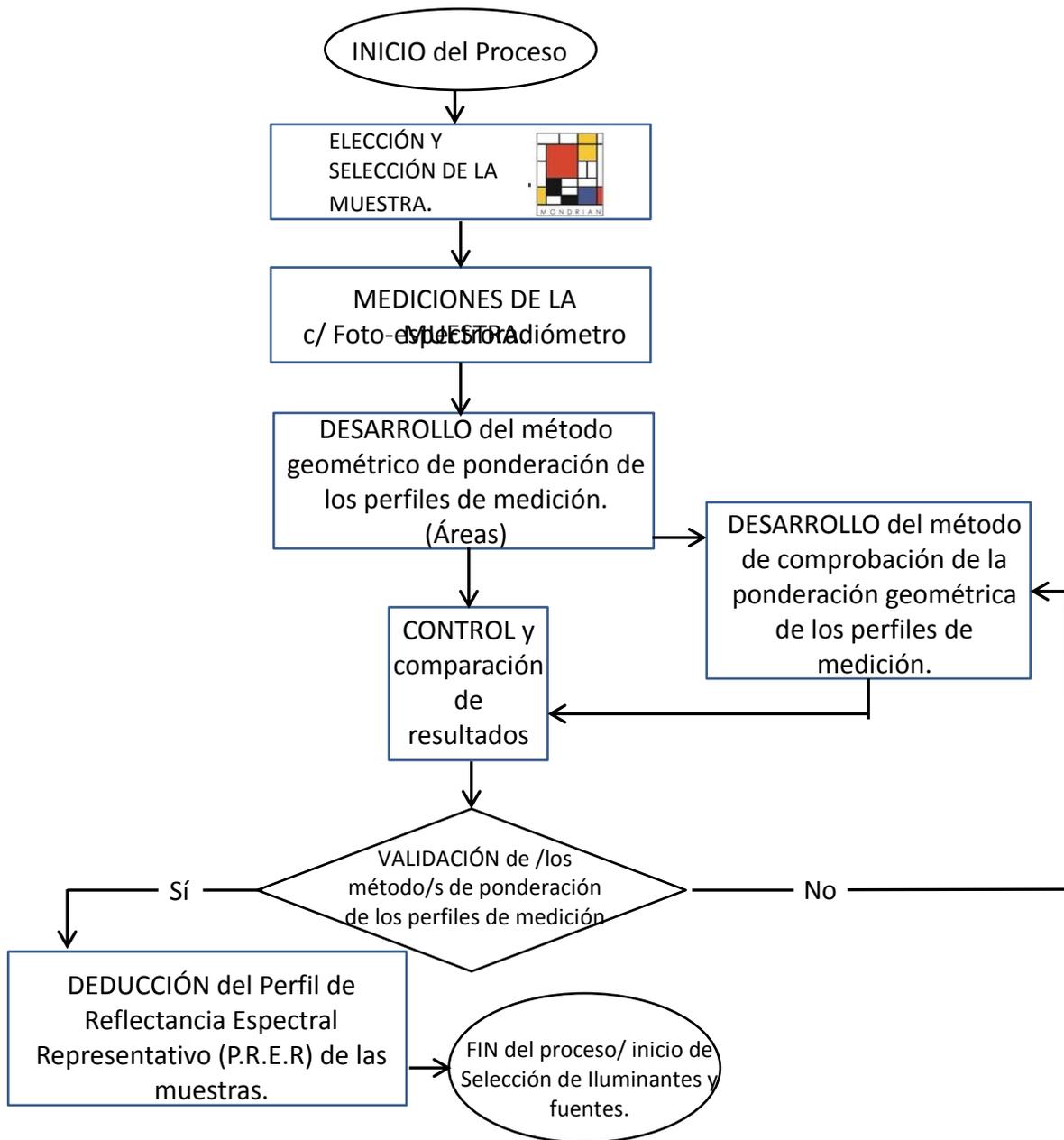


Fig. 3.1 Diagrama de flujo de metodología de adquisición de P.R.E.R.

La graduación tanto en la discriminación de áreas de diferentes colores en la composición de un ejemplar, como en la homogeneidad de sus colores, ordena la muestra desde un grado máximo en la muestra Mondrian 1921 (M1) hasta un mínimo en la obra Highway, de Klee (M4).



**Figura 3.2. Muestras M1, M2, M3 y M4.**

La determinación de un perfil de reflectancia representativo de cada muestra se ha realizado mediante el sistema de pasos que se ilustra mediante diagrama de flujo de la figura 3.2.

### **3.1.1. Mediciones de la muestra.**

Al inicio de la caracterización del perfil de reflectancia del objeto de exhibición, se ha considerado como más importante la información espectral del objeto, por sobre lo estrictamente colorimétrico, por lo tanto se ha realizado la medición de información espectral de las cuatro piezas de la muestra.

Las evaluaciones de cambio de color en los ejemplares de la muestra, se han realizado posteriormente en la etapa experimental, mediante el cálculo de los estímulos visuales, de las coordenadas cromáticas y de la variación de color en el espacio CIE  $L^*a^*b^*$  de los colores de la muestra. Dichos colores habrán estado expuestos a la radiación de tres distintos tipos de fuentes, uno de ellos el iluminador de lámparas de LEDs de emisión regulable, cuyo desarrollo constituyó además el cumplimiento de su correspondiente objetivo específico.

Asimismo, las mediciones espectrales de las muestras se han realizado en un tamaño constante, debido a que el equipo disponible en el Departamento de Luminotecnia, Luz y Visión, de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán, en donde se han realizado las mediciones, no cuenta con una lente de aumento.

Esa razón también ha impedido hacer una medición total de la obra, lo que hubiese sido de utilidad como instancia de comprobación de la representatividad del perfil de reflectancia obtenido para cada obra. Sin embargo, como se explica más adelante, se ha elaborado un criterio y un método de comprobación de la representatividad del perfil espectral deducido para cada caso.

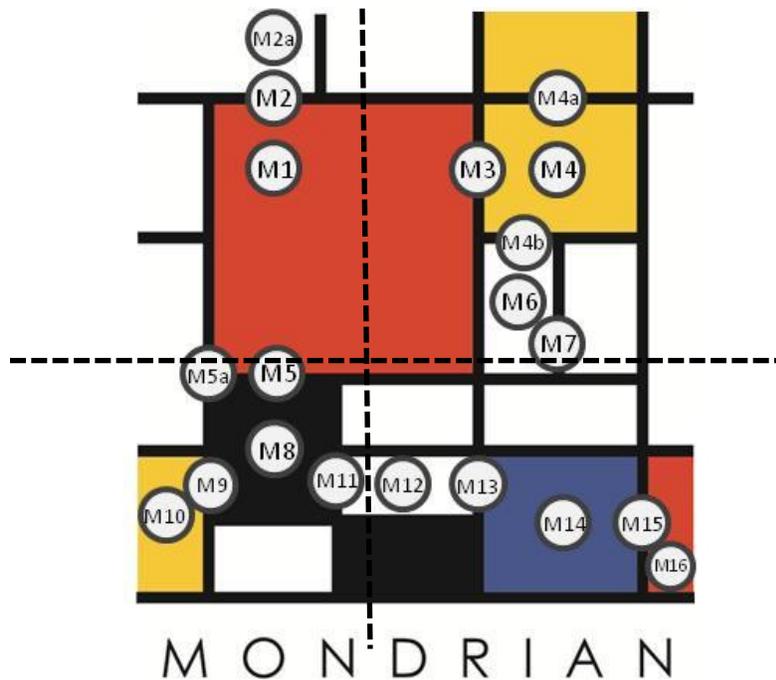
La importancia del cambio de tamaño en las mediciones espectrales para caracterizar superficies, se ha explorado bibliográficamente en varios trabajos de caracterización espectral de piedras graníticas [Araujo et al., 2010].

Los resultados de dichos estudios establecen que existe una relación directa entre la representatividad de los perfiles espectrales de una superficie de coloración compleja y la cantidad de mediciones espectrales tomadas sobre la misma superficie [Araujo et al., 2010].



**Figura 3.3. Montaje para mediciones espectrales.**

Por lo anterior, el criterio adoptado ha sido medir en tamaño constante, los diferentes colores y todos los cambios presentes en la obra en cantidad suficiente para establecer una descripción adecuada de la misma en cuatro cuadrantes, como se indica en la Figura 5. La medición se realizó en una cabina construida para tal finalidad, cuyas superficies internas han sido pintadas de blanco, son textura uniforme y cuentan con un soporte para las muestras.

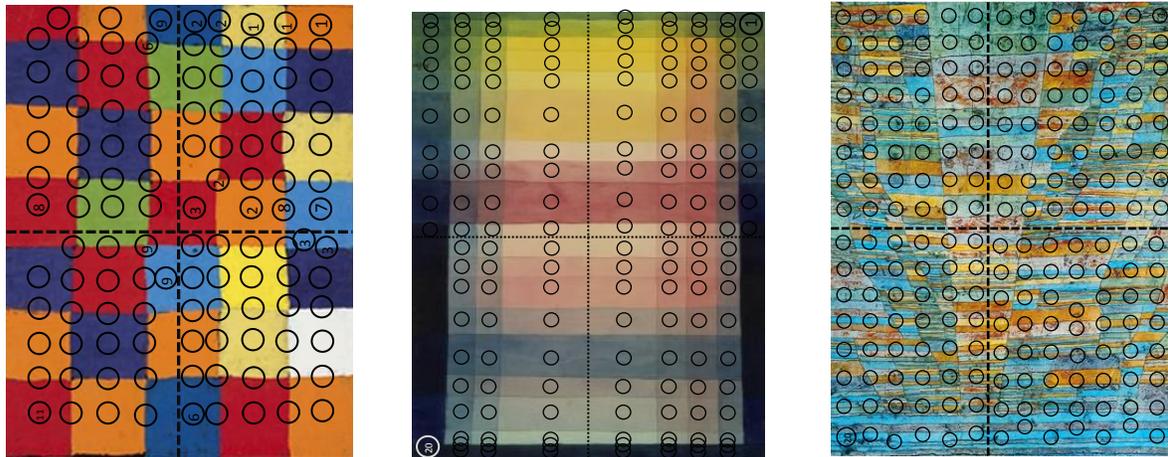


- |   |  |
|---|--|
| M1. Cuadrante superior- izquierdo. Rojo 100%          | M5a. Cuadrante inferior- izquierdo. Negro/ Rojo/ Blanco. |
| M2. Cuadrante superior-izquierdo.Rojo/ Negro/ Blanco. | M8. Cuadrante inferior- izquierdo. Negro100%.            |
| M2a. Cuadrante superior- izquierdo. Blanco 100%.      | M9. Cuadrante inferior- izquierdo. Negro/Amarillo.       |
| M3. Cuadrante superior-derecho.Rojo/Negro/ Amarillo.  | M10. Cuadrante inferior- izquierdo. Amarillo 100%.       |
| M4. Cuadrante superior- derecho. Amarillo100%.        | M11. Cuadrante inf.- izquierdo.Negro 50%/ blanco 50%.    |
| M4a. Cuadrante sup.-derecho.Amarillo/Negro/ amarillo. | M12. Cuadrante inferior- derecho. Blanco 100%.           |
| M4b. Cuadrante sup.-derecho. Amarillo/Negro/ Blanco.  | M13. Cuadrante inferior- derecho. Blanco/Negro/ Azul.    |
| M6. Cuadrante superior- derecho. Blanco 100%.         | M14. Cuadrante inferior- derecho. Azul 100%.             |
| M7. Cuadrante superior-derecho.Blanco/Negro/ Blanco.  | M15. Cuadrante inferior- derecho. Azul / Negro/ Rojo.    |
| M5. Cuadrante inferior- izquierdo. Negro/ Rojo.       | M16. Cuadrante inferior- derecho. Rojo 100%.             |

**Figura 3.4. Diagrama de mediciones espectrales**

La importancia del tamaño de las mediciones, es secundaria respecto de la cantidad de las mismas, siempre y cuando dicha cantidad de mediciones permitan un relevamiento suficientemente extensivo de la generalidad de los diferentes sectores y de las variaciones presentes en la superficie [Araujo et al., 2010].

El foto-espectroradiómetro empleado ha sido el Photoresearch Spectrascan PR 715. Las fuente utilizadas para la medición son lámparas de incandescencia, con un perfil de emisión aproximado al del Iluminante A de CIE, alimentadas con corriente eléctrica continua regulada a 45 Amperios (Fig. 3.3).



**Figura 3.5. Cantidad y ubicación de las mediciones realizadas en M2, M3 y M4.**

### **3.1.2. Procesamiento de las mediciones espectrales en las muestras M1-4.**

Las mediciones espectrales de todos los ejemplares de la muestra, luego de realizadas se han agrupado en cuatro cuadrantes. La razón de lo anterior ha sido la de realizar simultáneamente el análisis de la información espectral obtenida, tanto por cuadrantes como de manera general en la agrupación, para cotejar los resultados obtenidos con ambos procedimientos.

El procesamiento de las mediciones espectrales se ha realizado mediante un sistema de pasos que se detalla del siguiente modo:

a) Primeramente, las mediciones espectrales realizadas en el modo estándar del foto-espectrómetro han sido transformadas a perfiles de reflectancia propiamente dichas, a partir de separar el iluminante del estímulo visual.

Para ello, se ha procedido dividiendo los perfiles obtenidos en cada medición espectral, entre el perfil del iluminante obtenido con el color blanco de referencia. Alternativamente y a modo de comprobación de resultados, se ha realizado la misma operación de dividir el perfil de las mediciones estándar entre la medición del color blanco a los márgenes de la impresión de la obra, o sea del blanco del material de impresión.

Luego de comparadas las dos alternativas, se ha elegido la opción de usar el iluminante medido con el blanco de referencia y se han obtenido las correspondientes gráficas de perfiles espectrales para cada una de las mediciones y sus correspondientes valores de coeficientes de reflectancia.

El siguiente paso ha sido eliminar los datos de la radiación no visible, realizando un corte y selección de la información espectral medida, en el intervalo desde 400 nm. a 700 nm., tal como lo harían los filtros en la fase experimental, en atención a las recomendaciones de preservación del deterioro, encontradas en la bibliografía específica. (Fig.6). [Miller, 2005; Thomson, 2008; Torres Portero et al., 2008; Rico et al, 2009].

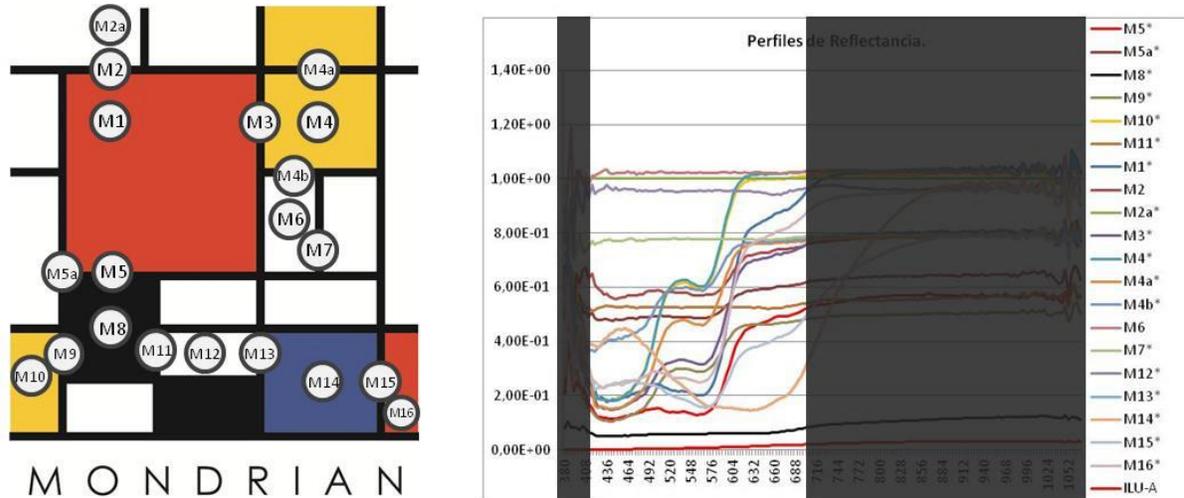


Figura 3.6. Mediciones y filtrado de UV. e I.R.

b) Una vez obtenidos los perfiles de reflectancia espectral de cada medición y luego de desechar la radiación no visible a partir de la selección de datos en el intervalo de bandas desde los 400 a 700 nm., se obtiene el Perfil de Reflectancia Espectral de cada ejemplar de la muestra, sin la ponderación de su representatividad.

El perfil de reflectancia espectral sin ponderación de su representatividad resulta de promediar todos los valores situados en una misma longitud de onda del espectro en cada medición. El promediado se realiza primero en cada uno de los cuadrantes y luego los resultados de los cuatro cuadrantes se procesa mediante un nuevo promedio que resulta en el Perfil de Reflectancia Espectral (P.R.E.) de cada ejemplar de la muestra.

En una primera instancia, el perfil de reflectancia espectral (P.R.E.) se dedujo en forma de una curva que contiene los valores de cada parte del espectro, promediados en un step de 10 nm.; posteriormente el perfil de reflectancia espectral se dedujo en la forma un perfil cuyos valores de medición habían sido promediados en tres intervalos diferentes según las siguientes tres zonas del rango visible: 400 a 490 nm., 500 a 590 nm., y 600 a 700 nm., lo que arrojaba un perfil de reflectancia espectral simplificado en tres niveles horizontales, de forma similar a una escalera.

Este segundo procedimiento de deducción del perfil de reflectancia espectral promedio se ha descartado luego, debido a que en la resultante de cada tramo, se perdían las particularidades de cada uno de los perfiles, especialmente los valles y picos pronunciados.

Sin embargo, el criterio de subdividir en tres intervalos las zonas del espectro visible, se ha aplicado posteriormente en la metodología de cálculo del *factor deteriorante*, que se explica en su capítulo correspondiente, ya que en ese caso el grado de perturbación de la onda electromagnética, que es indirectamente proporcional a su longitud de onda, tiene incidencia en el

deterioro potencial que la energía puede causar en la materia expuesta a la radiación. [Thomson, 2008].

El procedimiento aplicado en los cuatro casos de la muestra, ha sido el de realizar un promedio de todas y cada una de las mediciones espectrales en cada uno de los cuadrantes en que se subdividen las muestras, obteniéndose un Perfil de Reflectancia Espectral para cada uno de sus cuadrantes, primero y para toda la superficie luego.

Con el objeto de comprobar la validez de los perfiles hallados, simultáneamente se ha realizado el mismo proceso con los datos de mediciones espectrales para cada muestra, pero esta vez sin discriminarlas por cuadrantes. Los resultados entre los dos modos de agrupación de perfiles de medición, han sido coincidentes.

c) Luego de obtenerse el Perfil de Reflectancia Espectral (P.R.E) de las muestras M1, M2, M3 y M4, en todos los casos un promedio de todas las mediciones, lo siguiente y necesario era lograr un método para validar la verdadera representatividad de los mismos.

Lograr que el perfil de reflectancia espectral de una muestra sea representativo de ella, implica ponderar el valor que cada medición en cada zona de color y en todas las variaciones y/o cambios de color tiene en función del objeto total. Consecuentemente, su grado de participación en la integración final del perfil de reflectancia espectral (P.R.E.R.) de cada muestra.

Se considera a los dos primeros ejemplares de la muestra (M1 y M2), como aquellos compuestos por colores discriminados en zonas homogéneas. En los otros dos casos (M3 y M4) de la muestra, se entiende que la discriminación de sus zonas de color es sólo parcial y los colores dentro de dichas zonas son progresivamente heterogéneos de un ejemplar a otro.

Por ello se ha elegido un criterio de ponderación de doble comprobación. El primero de ellos ha sido un método geométrico: se han medido todas y cada una de las áreas compuestas de un color homogéneo y diferenciado en todas y cada una de las tres primeras muestras, M1, M2 y M3.

El valor de área obtenido para cada superficie de colores homogéneos y diferenciados se dividió entre el área total del objeto. De esta manera se establece la proporción del área total de la fracción de la que procede cada una de las mediciones espectrales realizadas y así se obtiene lo que se ha dado en llamar el coeficiente de ponderación de área (C.P.A.) de cada medición espectral.

El coeficiente obtenido mediante el procedimiento geométrico (C.P.A.), se considera como aquél que expresa la representatividad de cada medición cuando se integra en el Perfil de Reflectancia espectral del objeto total. Las mediciones pueden ser de un sólo color, en cuyo caso se denomina medición de 100% de homogeneidad, o bien de más de un color, en porcentajes de 50 y 25 (Fig. 3.4).

De manera parcial para el caso de las muestra M3, compuesta de zonas de colores discriminados aunque parcialmente heterogéneos y especialmente en el caso M4, compuesta por zonas de colores heterogéneos, ha resultado crecientemente difícil el cálculo del área en algunas zonas de M3 y en prácticamente todos los sectores de color de M4; áreas que debían ser divididas entre el área total de la muestra, para hallar sus correspondientes C.P.A.

La solución adoptada para tales casos, ha sido aplicar en las mediciones procedentes de áreas de difícil determinación, un coeficiente que se obtiene del área de medición del instrumento espectro-

radiómetro, mediante un sencillo procedimiento de calibración: a partir de una serie de círculos de diferentes tamaños previamente impresos y medidos en el borde lateral de las muestras M3 y M4, y manteniendo la distancia de medición del instrumento, se halla el área de medición del instrumento, en la coincidencia de uno de los círculos con el área de toma de datos de la mirilla del lente provisto por el instrumento en funcionamiento (Fig.3.7).

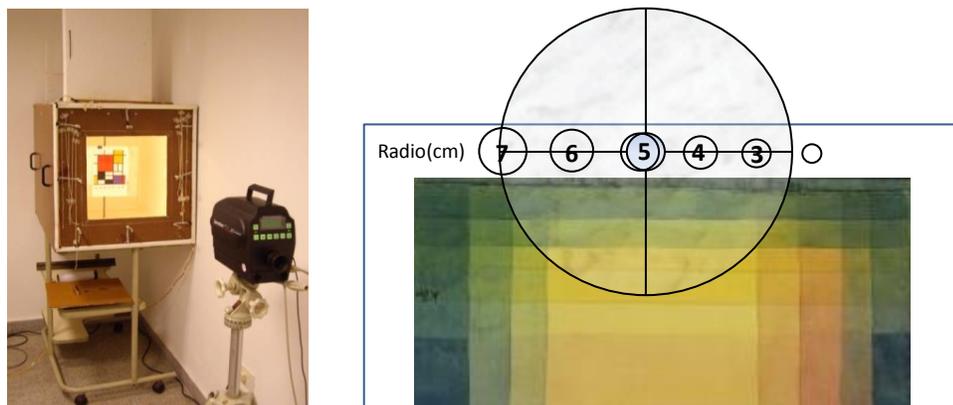
Es esa área de medición del instrumento obtenida a partir de su calibración, la que se ha dividido entre el área total de las muestras y con ello se ha obtenido un coeficiente para cada una de las mediciones espectrales realizadas (C.S.M.), la que se aplica en las mediciones de una zona de las muestras de difícil o imposible discriminación o bien por su heterogeneidad de color.

Complementariamente, el coeficiente de medición (C.S.M) se ha aplicado sobre una cantidad mayor de mediciones realizadas en las muestras M3 y M4, siempre con el criterio de lograr un relevamiento lo más exhaustivo posible del área y de las fracciones o partes de M3 y M4.

d) Como se anticipa en los párrafos anteriores, el siguiente paso de la metodología de adquisición de perfiles espectrales de obras de arte, consiste en aplicar los coeficientes de ponderación hallados para los cuatro ejemplares de la muestra: se multiplica cada coeficiente de ponderación de área ( C.P.A.) o en su defecto, el coeficiente de medición (C.S.M.), por su correspondiente perfil espectral, es decir, el perfil espectral cada medición tomada de las muestras según convenga a cada muestra.

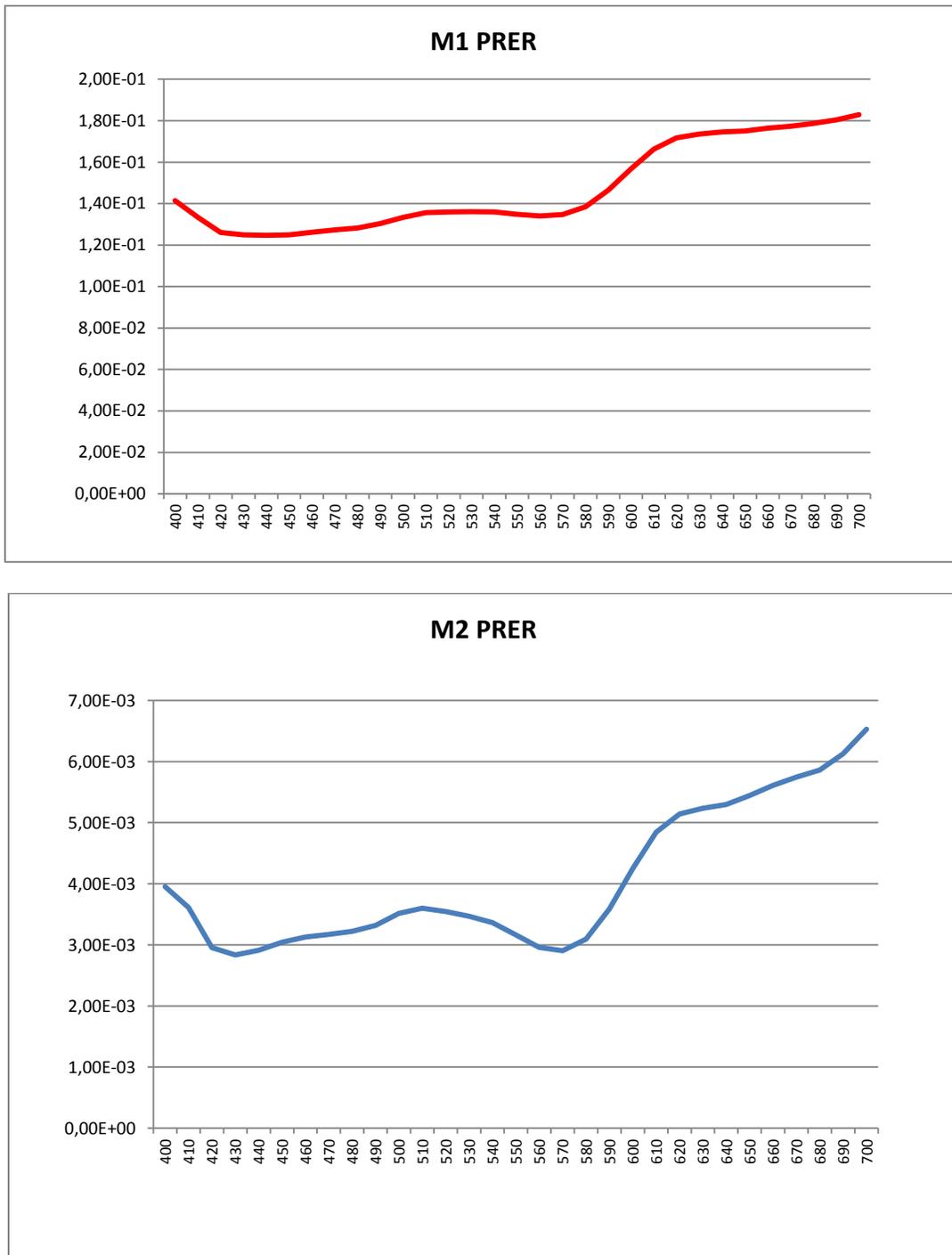
En las muestras M1 y M2, al estar compuestas por colores homogéneos claramente discriminados en zonas, el método de los coeficientes de áreas ha sido perfectamente suficiente .En el caso de M3, en el que una parte del área es homogénea y otra parte de ella no lo es, se ha aplicado una combinación de procedimientos, según la cualidad de homogeneidad de la fracción medida, para aplicar su correspondiente coeficiente de ponderación de área C.P.A. o bien el coeficiente de medición C.S.M.

Para la muestra M4, ejemplar en el que la homogeneidad de las zonas de color es casi excepcional, se ha aplicado en todas las mediciones, el coeficiente de mediciones (C.S.M.) sobre un número mayor y suficiente de mediciones espectrales.

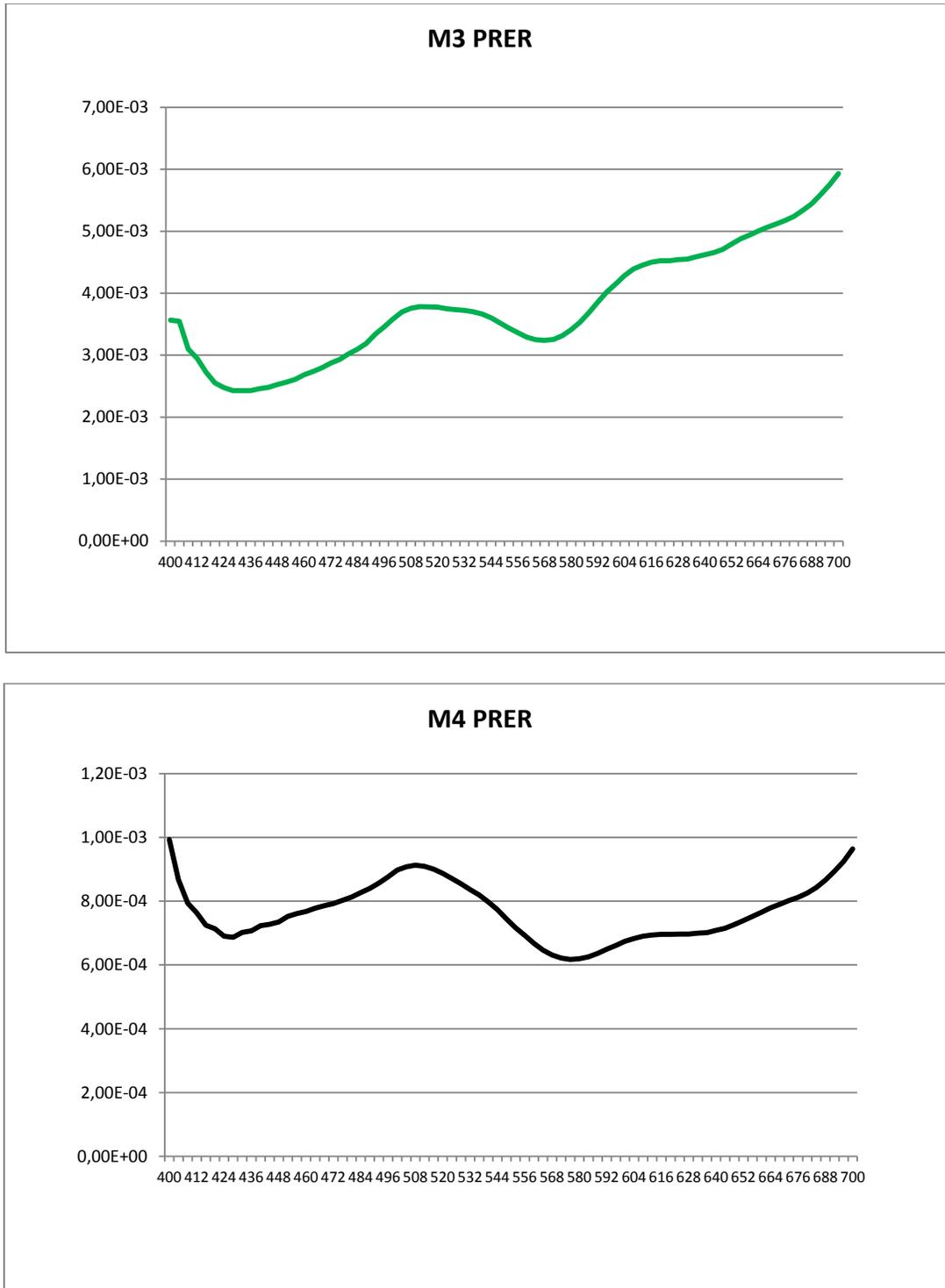


**Figura 3.7. Esquema de obtención del C.S.M.**

e) El último paso de la metodología de adquisición y deducción de Perfiles de Reflectancia espectral representativos de una obra de arte, es la integración de la información espectral en un perfil de reflectancia espectral representativo (P.R.E.R.) de cada ejemplar de la muestra.



**Fig. 3.8. Perfiles de Reflectancia Espectral Representativos (P.R.E.R.) de las muestras M1, M2.**



**Fig. 3.9. Perfiles de Reflectancia Espectral Representativos (P.R.E.R.) de las muestras M3 y M4.**

Los coeficientes (C.P.A) y (C.S.M.) al multiplicarse por el perfil espectral de sus correspondientes mediciones, producen el valor ponderado de todas y cada una de las mediciones espectrales en la subsiguiente integración de los perfiles de reflectancia espectral de los ejemplares M1, M2, M3 y M4 de la muestra.

Dicha integración se produce luego de que los perfiles espectrales ponderados, de todas y cada una de las mediciones se promedian entre sí, en cada uno de los cuatro cuadrantes en que se dividen las muestras y finalmente en la totalidad de cada de ellas.

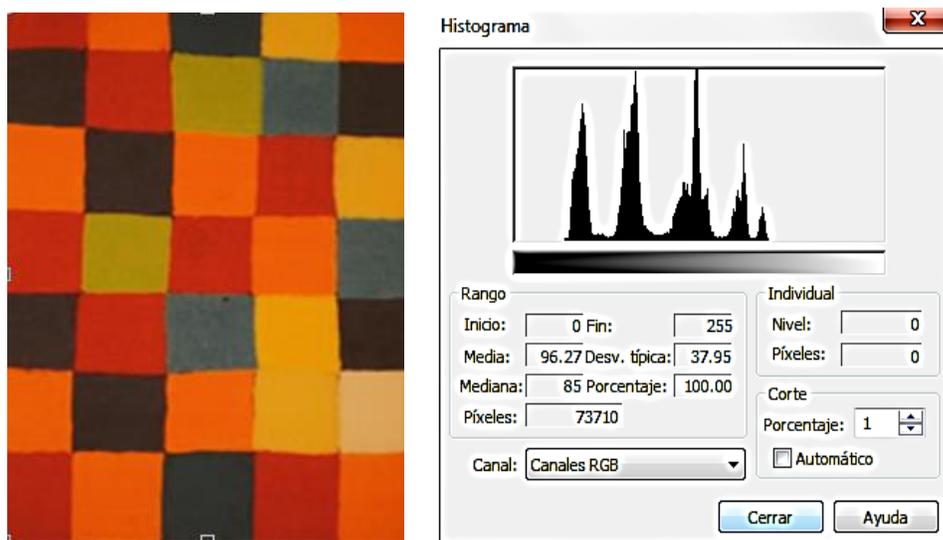
Los perfiles obtenidos de esta manera, se denominan **Perfil de Reflectancia Espectral Representativo (P.R.E.R.)** para cada una de las muestras M1, M2, M3 y M4 (Fig.3.8 y 3.9).

### **3.1.3 Método de comprobación de los coeficientes de área (C.P.A.).Método de píxeles (C.Pix).**

Se ha desarrollado un segundo método de ponderación de las mediciones espectrales en su integración en los perfiles de reflectancia espectral de las muestras, que se ha empleado para comprobación y validación del método geométrico, que se ha denominado Método de los coeficientes de píxeles (C.Pix.).

Como se ha indicado anteriormente, tanto el diferente grado de discriminación de los colores de las distintas muestras, como su también diferente grado de homogeneidad, plantean la necesidad de comprobar la validez del método geométrico al ponderar del valor de las mediciones espectrales de las distintas zonas de color en la integración de cada perfil de reflectancia espectral representativo (P.R.E.R.) de las muestras.

La validez de los métodos de ponderación es de gran importancia, ya que de ella surge el valor de la representatividad del P.R.E.R. de cada uno de los ejemplares de la muestra. Para realizar la comprobación del método geométrico de los coeficientes de ponderación de área (C.P.A.y C.S.M.), empleados para sopesar la participación de cada una de las mediciones en los perfiles de reflectancia espectral representativos (P.R.E.R.) de la muestra experimental, se ha desarrollado un método que implica analizar los histogramas de la imagen digital de cada una de las muestras.



**Figura 3.10. Imagen digital e histograma RGB de M2**

Esquemáticamente, la solución se ha planteado del modo siguiente: un método geométrico, que relaciona la proporción de área de cada medición respecto del área total de cada muestra, con la información o data espectral obtenida para la misma medición, se contrasta con otro generado a partir del análisis de la información de la imagen digital de cada una de las muestras.

Dicho método, que se explica detalladamente a continuación, permite obtener los coeficientes de píxeles (C.Pix.) que se multiplicarán luego como factor de la información espectral de cada medición de las muestras en la integración de su correspondiente perfil de reflectancia espectral representativo (P.R.E.R.)

**3.1.3.a.** El primer paso para la elaboración de un método de comprobación de los coeficientes de área, en adelante denominado método de los coeficientes de píxeles (C.Pix.), ha sido tomar fotografías de las muestras M1, M2, M3 y M4 en la misma cabina de mediciones en las que previamente se habían tomado las mediciones espectrales y en las mismas condiciones de iluminación, esto es, mediante lámparas de incandescencia cuyo perfil de emisión es relativamente aproximado al del iluminante A de C.I.E.

Las fotografías posteriormente han sido procesadas mediante un software que permite el análisis de sus histogramas, para el caso se ha elegido Corel Photo paint, que cumple con las prestaciones y requisitos necesarios para el procesamiento de las imágenes digitales de cada pieza de la muestra

En estadística, un histograma es una representación gráfica de una variable en forma de barras, donde la superficie de cada barra es proporcional a la frecuencia de los valores representados [Atienza, 2006].

Sirve para obtener una "primera vista" general, o panorama, de la distribución de la población, o la muestra, respecto a una característica, cuantitativa y continua, de la misma y que es de interés para el observador [Atienza, 2006].

En el caso de una imagen digital, ésta se re-interpreta y ordena en su correspondiente histograma, como una distribución de píxeles según su grado de luminosidad, que los ubica según corresponda en una escala de 255 niveles de gris, desde el negro en el cero del lado izquierdo, pasando por los distintos niveles de luminosidad, hasta llegar al blanco en 255.

El histograma permite además un conteo de la cantidad de píxeles que componen una imagen digital, de modo que la suma de todos píxeles en los 255 niveles de gris, da cuenta de la totalidad de píxeles de la imagen digital. Adicionalmente, los histogramas de una imagen digital pueden hacerse con píxeles RGB, o bien, con píxeles de un solo canal de color, ya sea rojo, verde o azul.

### **3.1.3.b. Relaciones que se deducen del histograma de una imagen digital.**

Para la elaboración del método de píxeles (C.Pix.) que permita la comprobación y validación de los coeficientes de ponderación de área (C.P.A.), ha sido necesario profundizar en el análisis de las relaciones que se deducen de un histograma, por ser las que estructuran la lógica del método.

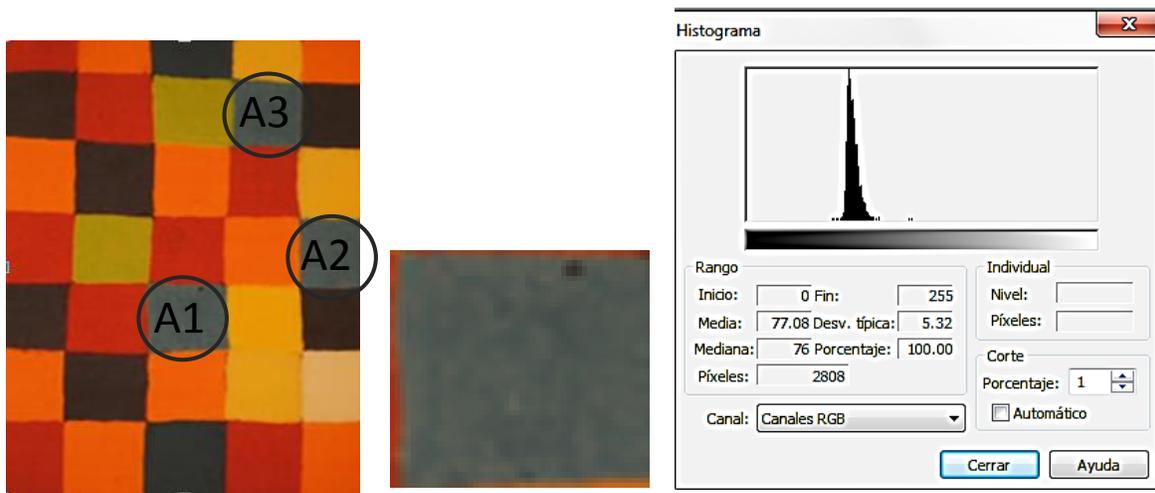
En la figura 3.10 tenemos a la izquierda la imagen digital de la muestra M2, la reproducción de la pintura de Klee llamada Fabertable. Inmediatamente a su derecha se encuentra el histograma del total de la imagen de M2 en RGB, con la curva completa de distribución de grises y su correspondiente información de rango, derivación típica, mediana y la cantidad total de píxeles de

la imagen. También pueden obtenerse sendos histogramas de la misma imagen, pero en cada caso discriminados en los canales de colores rojo, verde y azul, respectivamente.

En la figura 3.11 se señala en la imagen digital de M2 y en los círculos numerados de 1 al 3 la selección y recorte de un color específico, para este caso un determinado tipo de azul.

A manera de ejemplo explicativo: si se hace un recorte de la imagen digital M2, en tal caso sólo la parte correspondiente al azul al que denominamos A1, de dicho recorte obtenemos no sólo una segunda imagen digital, que es a su vez una fracción de la imagen digital de M2, sino que de la fracción misma puede obtenerse su propio histograma RGB, con lo que se obtiene la curva de distribución de grises de A1 y su correspondiente información de rangos y cantidad de píxeles.

Idénticamente al caso de la imagen digital de la totalidad de M2, junto con los histogramas RGB de la fracción de la imagen, pueden obtenerse sus correspondientes histogramas de canal rojo, verde y azul para el recorte azul A1. Del mismo modo, se pueden obtener los histogramas de cada una de las áreas de color azul A2, y A3, y de todas las áreas de color componentes de la muestra M2. (Fig.3.11)



**Fig 3.11. Imagen digital de M2, ampliación y recorte de la zona de color A1 e histograma RGB de A1.**

La curva de distribución de píxeles en la escala de grises, del histograma de la zona de color azul A1, puede intersectarse con en el histograma de la imagen total de M2. Esto permite encontrar la ubicación del histograma de la fracción azul A1 de M2, dentro el histograma del total de la imagen de M2, pero también permite hallar su participación proporcional dentro del mapa de grises de la imagen total. Para el caso de la zona azul A1, su histograma se representa como la curva graficada también en color azul, que se inscribe dentro de la curva completa de distribución de píxeles del histograma de la imagen total de M2, esquematizada en color gris en la figura 3.12.

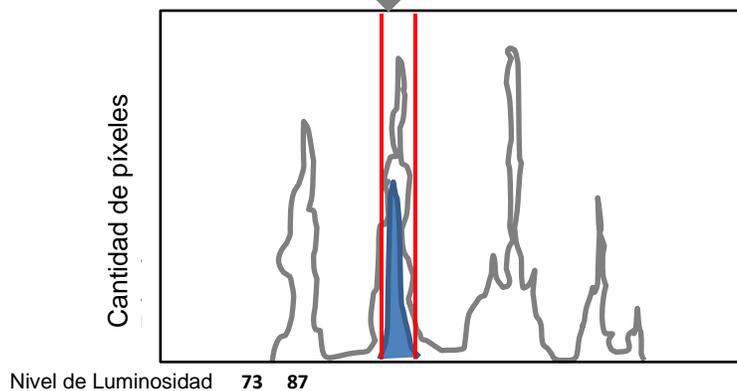
Se infiere entonces, que la curva de distribución de píxeles RGB en la escala de grises de la imagen digital total de M2, puede entenderse como la sumatoria de las correspondientes curvas de distribución de píxeles RGB de los histogramas de todas y cada una de las zonas de color o fracciones que forman la imagen digital de M2 (Fig.3.12.).

Idéntica relación a la que se observa entre los histogramas RGB entre la totalidad y las partes de la imagen digital de un ejemplar de la muestra, en este caso M2, se verifica para los histogramas de los canales de color rojo, verde y azul. Los histogramas de canal rojo, verde y azul son una

alternativa que ofrecen los software de procesamiento de imagen, que organiza a los píxeles del histograma de una imagen digital previamente codificada a través de un solo canal de color, en una curva de distribución de píxeles ordenados de acuerdo a su nivel de luminosidad [Atienza, 2006].

Es decir que la curva de distribución de píxeles en la escala de grises para el canal rojo de la imagen total M2, por ejemplo, es resultado de la integración de las correspondientes curvas de distribución de píxeles del canal rojo de todas y cada una de las zonas de color, de la imagen digital de M2 y así para los histogramas de canal de un solo color.

$$q \text{ pix } M2 = q \text{ pix } \textcircled{A1} + q \text{ pix } \textcircled{A2} + q \text{ pix } \textcircled{A3} + \dots + q \text{ pix } .n$$



**Figura 3.12. Esquema de la integración de histogramas parciales**

Por otra parte, dada la intersección de: a) la curva de distribución de píxeles de los histogramas de una fracción cualquiera de la imagen digital de M2, en el ejemplo la zona de color A 1; y b) la curva de distribución de píxeles del total de la imagen digital de M2 (Fig.3.12) ,ya sean píxeles RGB o de un sólo canal de color- es posible situar y aislar una banda de niveles de gris, que está delimitada por el inicio y el final de la intersección de ambas curvas.

En el esquema de la figura 3.12, dichos límites de banda se representan mediante las dos líneas verticales de color rojo, que enmarcan entre los niveles 73 y 87, el rango o intervalo de la escala de grises dentro del cual se sitúan los valores del histograma específico del área seleccionada de azul A1 en su intersección con el histograma de la imagen digital de la totalidad de M2.

Dicha banda contiene entre sus límites:

- Todos los píxeles – sean RGB o de un canal de color en sendos casos- de la curva de distribución de grises, que pertenecen a la zona de color o fracción seleccionada A1. Dichos píxeles se representan en el esquema dentro de la curva graficada en color azul (Fig.3.12)
- Todos los píxeles – sean RGB o de un canal de color en sendos casos- pertenecientes a los otros colores o fracciones de M2, cuya luminosidad los sitúa en algún lugar de la banda delimitada por la intersección de los histogramas de M2 y de A1. Dichos píxeles representan una cantidad adicional a la cantidad de píxeles de A1, por ello se sitúan a una altura mayor que la altura máxima de la curva de los píxeles A1 en el eje de las ordenadas del gráfico y se representan dentro del intersticio de fondo blanco, formado por el límite interno de la curva del histograma total de M2 en la banda 73-87 (línea en color gris) y por el límite externo de la curva de A1, en línea azul (Fig.3.12).

Una vez establecida la relación entre los histogramas intersectados de M2 y de cualquier fracción de M2, por ejemplo los azules A1, A2 y A3, puede conocerse:

- La cantidad de píxeles de la imagen total de M2, ubicados por su nivel de luminosidad en la banda de intersección con el histograma de una fracción de M2 analizada. Para el caso de A1, los límites hacia la izquierda y derecha, respectivamente son los niveles 73 y 87 y se expresa:

$$Q \text{ Pix } M2_{73-87} \quad (1)$$

- La suma de las respectivas cantidades de píxeles ubicadas dentro de la banda generada por la intersección, correspondientes a cada zona de color y a colores de diferente cromaticidad cuyos píxeles se ubican en la banda gracias a sus niveles de luminosidad :

$$q \text{ pix } A1; q \text{ pix } A2; q \text{ pix } A3; \dots q \text{ pix } Zn = Q \text{ Pix } M2_{73-87} \quad (2)$$

- La proporción que supone la cantidad de píxeles del histograma de una fracción de M2 ( $q \text{ pix } A1$ ), respecto de la cantidad de píxeles del histograma de la imagen digital total de M2 ubicados en la banda de niveles de gris determinada por la intersección de los histogramas analizados ( $Q \text{ Pix } M2_{73-87}$ ):

$$Rf = \frac{q \text{ pix } Zn}{Q \text{ Pix } M2_{73-87}} \quad (3)$$

- La proporción entre la cantidad de píxeles del histograma de una fracción cualquiera de M2 ( $q \text{ pix } Zn$ ) y la cantidad de píxeles del histograma completo de la imagen digital total de M2 ( $Q \text{ Pix } M2_{0-255}$ ):

$$RZ = \frac{q \text{ pix } Zn}{Q \text{ Pix } M2_{0-255}} \quad (4)$$

- La proporción entre la cantidad total de píxeles ubicados en la banda definida por la intersección de los histogramas total y parcial de la imagen ( $Q \text{ Pix } M2_{73-87}$ ) respecto de la cantidad total de píxeles del histograma de la imagen digital completa de la muestra ( $Q \text{ Pix } M2_{0-255}$ ).

$$Rb = \frac{Q \text{ Pix } M2_{73-87}}{Q \text{ Pix } M2_{0-255}} \quad (5)$$

La hipótesis detrás del método de los coeficientes de píxeles (C. Pix.) para la comprobación y validación de los coeficientes de ponderación de área (C.P.A) sostiene que dadas las relaciones del histograma de una imagen digital anteriormente definidas, la proporción de píxeles de una zona de color o fracción de una imagen digital, respecto de la cantidad de píxeles de la imagen total (4), debe ser igual al producto de otras dos relaciones: a) la proporción de píxeles de una zona de color, respecto de la cantidad de píxeles del histograma de la imagen total que se ubica en la banda delimitada por la intersección de ambos histogramas (3), multiplicada por b) la proporción de la cantidad píxeles ubicados en la banda definida por la intersección de los histogramas analizados, respecto de la cantidad total de píxeles del histograma completo de la imagen digital total de la muestra analizada (5). Lo anterior queda expresado de la siguiente manera:

$$\frac{q \text{ pix } Zn}{Q \text{ Pix } M2_{0-255}} = \left( \frac{q \text{ pix } Zn}{Q \text{ Pix } M2_{73-87}} \right) * \left( \frac{Q \text{ Pix } M2_{73-87}}{Q \text{ Pix } M2_{0-255}} \right) \quad (6)$$

La tabla 3.3 ilustra cuantitativamente las relaciones antes analizadas. Tenemos ordenados verticalmente las siguientes entidades definidas: en primer lugar información del histograma completo de la imagen total de M2; luego la banda del histograma de M2 en sus niveles mínimo (73) y máximo (87) de luminosidad, que queda definida por la intersección del histograma de la imagen digital total de M2 con el histograma del sector de color analizado, sea A1, A2 o A3.

También se detallan los análisis de los histogramas específicos de cada zona de color analizada, por caso los azules A1, A2, A3 y finalmente, el total de la sumatoria de estas mismas tres zonas de color o fracciones de M2.

<b>M2. MÉTODO DE COEFICIENTES DE PÍXELES – VERIFICACIÓN DE LOS COEFICIENTES DE PONDERACIÓN DE ÁREA ( C.P.A.)</b>									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Límite izq. De banda (niveles)	Pico de banda (niveles)	Límite der. De banda (niveles)	Ancho de banda (niveles)	Altura Promedio (cant. de píxeles)	Cantidad de Píxeles RGB	Coeficiente de píxeles (C.Pix)= $\frac{q \text{ pix } Zn}{Q \text{ Pix } M2_{0-255}}$	Coeficiente de píxeles (C.Pix)= = $\left( \frac{q \text{ pix } Zn}{Q \text{ Pix } M2_{73-87}} \right) * \left( \frac{Q \text{ Pix } M2_{73-87}}{Q \text{ Pix } M2_{0-255}} \right)$	Coeficiente de Ponderación de área. (C.P.A.)	
M2 total	0	255	255		106.218				
M2 banda 73-87	73	83	87	15	1449	21.735			
M2 azul 1	81	84	87	7	471	3.294	0,0310	0,0310	0,0298
M2 azul 2	75	80	87	9	324	2.915	0,0274	0,0274	0,0253
M2 azul 3	73	80	87	15	180	2704	0,0255	0,0255	0,0276
Suma M2 Azul 1,2,3	73		87	15		8.913			

**TABLA 3.3. Cálculo de Coeficiente de píxeles.**

Ordenados horizontalmente, los tres primeros lugares de la izquierda, informan del límite mínimo y máximo de la escala de luminosidad, dentro los cuales se ubican los píxeles de cada una de las entidades definidas. En el caso del histograma completo de M2, el subíndice indica que se toma todo el espectro del histograma; en el caso de las bandas surgidas de la intersección de los histogramas de M2 y cada uno de los azules analizados A1, A2 y A3, se informa de los límites definidos por cada intersección a la izquierda y a la derecha. También se consigna el nivel en el que se ubica el pico máximo de cantidad de píxeles del histograma de cada entidad.

Inmediatamente hacia la derecha en las columnas 4 a 5 de la tabla 3.3, se consignan los datos del ancho y de la altura en cantidad de píxeles promedio para cada histograma especificado. Seguidamente, en la columna 6 aparece el resultado de la cantidad total de píxeles presente en cada una de las entidades correspondientes.

Siguiendo en el mismo sentido la lectura de la tabla 3, en las siguientes columnas 7 y 8 separadas a la derecha de la tabla, se encuentra el llamado coeficiente de píxeles (C.Pix.). El coeficiente de píxeles (C.Pix.) es aquél que resulta de verificar en cada uno de sus términos, los resultados de la igualdad expresada en (6).

En el extremo derecho de la tabla 3.3 se encuentra la columna 9, en la que se consignan los coeficientes de ponderación de área (C.P.A.) que corresponden a las mismas zonas analizadas A1, A2 y A3 con el método geométrico de valoración de la representatividad de los perfiles de reflectancia espectral de cada una de las muestras

La elaboración del método de los coeficientes de píxeles (C.Pix.) para la comprobación y validación de los coeficientes de área (C.P.A.) supone necesario que al menos en una de sus instancias, comparados los coeficientes obtenidos mediante el método del análisis de los histogramas con los coeficientes obtenidos mediante el método geométrico, se evidencie una igualdad o aproximación suficiente en los resultados obtenidos.

Para entender mejor este último concepto, debemos recordar que la razón fundamental de la necesidad de una comprobación y validación del método geométrico estriba en el carácter de la muestra. Las reproducciones de obras de arte, componentes de la muestra, se han ordenado según el tipo de colores que las conforman, los que en las dos primeras M1 y M2, están perfectamente discriminados en zonas de un mismo color que es a su vez homogéneo o relativamente homogéneo. Los dos últimos componentes de la muestra, M3 y M4, especialmente en el último caso, se componen de colores que no están totalmente discriminados en zonas de color homogéneo o bien, dichas zonas son decididamente heterogéneas.

Lo anterior resulta en una creciente dificultad de aislar y calcular el área de algunas de las zonas de color de la muestra M3 y en la virtual imposibilidad de hacerlo en la muestra M4. Para superar dicha dificultad, el método geométrico de ponderación de la representatividad de un perfil, recurre al empleo del área de toma de datos del instrumento de medición y al aumento en la cantidad de mediciones realizadas en las muestras, manteniendo siempre el criterio de obtener el mejor relevamiento posible todas las áreas de color.

El método de los coeficientes de píxeles (C.Pix.) procede de manera distinta, como se ha explicado anteriormente, a partir de analizar los histogramas tanto de las imágenes digitales totales como de las imágenes digitales parciales de los componentes de las muestras.

El caso de M2, se entiende como aquella instancia en la que se produce la comprobación del método geométrico, ya que se le considera como el caso que presenta el límite de transición entre los dos componentes de las muestras cuyas zonas de color están discriminadas y/o son homogéneas, hacia los dos componentes de la muestra cuyos colores son, parcial y/o totalmente heterogéneos.

Se infiere entonces, que tanto en el análisis de M1 y particularmente en el análisis de M2, ambos métodos de ponderación, a través de sendos y diferentes procedimientos, deben confluir en resultados idénticos o de suficiente aproximación al ponderar las diferentes zonas de una muestra, para que se logre la comprobación y validación mutua entre ambos métodos. Lo anterior es verificable, precisamente porque en esas muestras (M1 y M2) es posible realizar ambos tipos de análisis sin ninguna restricción y consecuentemente se puede realizar la comparación de resultados.

### 3.1.3c Comparación de resultados de los Coeficientes de Píxeles (C.Pix.) y de área (C.P.A.)

- Previamente, de la Tabla 3.3 se deduce que para el caso analizado de las zonas de color azul, que la cantidad de píxeles de los histogramas de A1, A2 y A3, sumados dan un total de 8.913 píxeles:  $q \text{ pix } A1; q \text{ pix } A2; q \text{ pix } A3; \dots q \text{ pix } Zn = Q \text{ Pix } M2_{73-87}$ .
- Asimismo, vemos que la cantidad total de píxeles de M2 ubicados en la banda dada por la intersección de histogramas de M2 y de las zonas de color analizadas, en este caso en el intervalo de niveles de luminosidad que va del 73 al 87 ( $Q \text{ Pix } M2_{73-87}$ ), es de 21.735 píxeles.
- También se verifica que la cantidad de píxeles ubicados en la banda 73-87 del histograma de M2, que no pertenecen a ninguna de las zonas de color azul A1, A2 ni A3, surge de la sustracción entre  $Q \text{ Pix } M2_{73-87} = 21.735 \text{ pix.}$ , menos el total de píxeles de todos los azules,  $Q \text{ pix } A1 + A2 + A3 = 8.913 \text{ pix.}$ , y que resulta en 12. 822 pix.
- Estos últimos son los píxeles no pertenecientes a las zonas de color azul analizadas A1, A2 y A3, sino pertenecientes a otros colores de distinta cromaticidad, cuyos valores de luminosidad los ubican dentro de la banda 73-87, definida por la intersección entre el histograma de la imagen total de M2 y los histogramas de las zonas de color o fracciones analizadas.

Surge de los resultados de Tabla 3.3:

A. La comprobación de la igualdad:

$$\frac{q \text{ pix } Zn}{Q \text{ Pix } M2_{0-255}} = \left( \frac{q \text{ pix } Zn}{Q \text{ Pix } M2_{73-87}} \right) * \left( \frac{Q \text{ Pix } M2_{73-87}}{Q \text{ Pix } M2_{0-255}} \right) \quad (6)$$

Los resultados obtenidos para el coeficiente de píxeles (C.Píx.) que se consignan en las columnas 7 y 8 son exactamente iguales.

- B. La comparación entre los coeficientes de píxeles (C.Píx.) de las columnas 7 - 8 y los coeficientes de área (C.P.A.) de la columna 9 de la tabla 1, verifica una paridad suficientemente aproximada de resultados, obtenidos por medio de los dos diferentes métodos de ponderación: para los colores azules (A1, A2, y A3) de la muestra M2 que se ilustran en la tabla 1, las diferencias entre los resultados de los coeficientes de píxeles y de área, se encuentran en el orden de magnitud del centésimo.
- C. Lo anterior permite inferir la comprobación y la validación mutua de los dos métodos de ponderación desarrollados para valorar los perfiles espectrales de todas y cada una de las mediciones de las distintas zonas de la muestra, al integrarse en el Perfil de Reflectancia Espectral Representativo (P.R.E.R) del ejemplar M2.

El análisis de los histogramas de imagen digital y el cálculo de los coeficientes de píxeles (C.Píx.) con el objetivo de comprobar y validar los coeficientes de área (C.P.A.), se ha realizado para todas las zonas de color de la muestra M2. Los resultados y su comparación se detallan en la tabla 3.4.

<b>MET.DE ADQUISICIÓN DE PERFILES DE REFLECTANCIA. VERIFICACIÓN DE COEFICIENTES DE ÁREA. FABERTABLE M2. RESULTADOS COMPARADOS DE LOS COEFICIENTES DE PÍXELES (C. Pix.) Y DE ÁREA ( C.P.A.)</b>								
	Límite izq. De banda (niveles)	Pico de banda (niveles)	Límite der. De banda (niveles)	Ancho de banda (niveles)	Altura Promedio (cant. píxeles).	Cantidad de Píxeles RGB	Coef. píxeles. (C. Pix.)	Coef. área. (C.P.A.)
M2 Total	0		255			106.218		
M2 A1	81	84	87	7	471	3.294	0,0310	0,0298
M2 A2	75	80	87	9	324	2.915	0,0274	0,0253
M2 A3	73	80	87	15	180	2704	0,0255	0,0276
M2 Am 1	154	158	160	6	642	3849	0,0362	0,0303
M2 Am 2	152	158	160	9	451	4057	0,0382	0,0307
M2 Am 3	147	157	154	8	246	1964	0,0185	0,0174
M2 N1	116	119	123	8	411	3284	0,0309	0,0373
M2 N2	108	115	120	13	197	2555	0,0240	0,0325
M2 N3	120	123	125	6	427	2561	0,0241	0,0286
M2 N4	447	889	106	277	583	4079	0,0384	0,0310
M2 N5	124	126	129	6	556	3335	0,0314	0,0291
M2 N6	123	125	128	6	566	3396	0,0320	0,0323
M2 N7	124	125	128	5	621	3106	0,0292	0,0307
M2 N8	113	116	118	6	231	1383	0,0130	0,0157
M2 N9	111	113	116	6	211	1265	0,0119	0,0176
M2 R1	71	75	80	10	338	2368	0,0223	0,0323
M2 R2	71	75	80	10	489	4890	0,0460	0,0359
M2 R3	81	83	86	6	484	2901	0,0273	0,0326
M2 R4	82	84	86	5	505	2524	0,0238	0,0311
M2 R5	80	83	85	6	433	2597	0,0244	0,0279
M2 R6	78	80	83	6	421	2526	0,0238	0,0275
M2 R7	78	80	82	5	521	2605	0,0245	0,0307
M2 R8	74	76	77	4	253	1010	0,0095	0,0161
M2 Añil 1	45	48	51	7	480	3360	0,0316	0,0428
M2 Añil 2	42	44	48	7	407	2849	0,0268	0,0317
M2 Añil 3	45	48	50	6	356	2133	0,0201	0,0254
M2 Añil 4	39	40	43	5	404	2018	0,0190	0,0246
M2 Añil 5	44	46	48	5	539	2694	0,0254	0,0319
M2 Añil 6	41	42	46	6	440	2640	0,0249	0,0279
M2 Añil 7	37	39	42	5	434	2168	0,0204	0,0261
M2 Añil 8	44	48	50	7	227	1586	0,0149	0,0189
M2 V 1	130	133	135	6	468	2807	0,0264	0,0306
M2 V 2	124	125	128	6	472	2831	0,0266	0,0326
M2 Blanco	168	171	174	7	378	2646	0,0249	0,0271

**Tabla 3.4. Resultados de la verificación de coeficientes de área.**

También se ha aplicado el mismo método de análisis de los histogramas de imagen digital y con ello se han hallado los coeficientes de píxeles (C.Píx.) para las muestras M1 y M3. En todos los casos, los resultados hallados son lo suficientemente aproximados para confirmar y validar los coeficientes previamente obtenidos mediante el empleo del método geométrico.

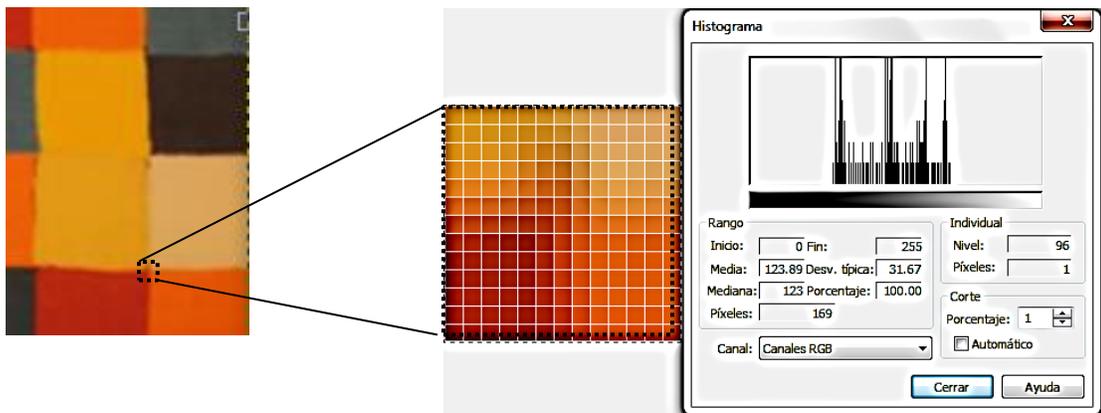
Una vez realizada la comprobación de los coeficientes en las tres primeras muestras, se ha procedido a la ponderación de las mediciones de M4 con el método de los coeficientes de píxeles (C.Píx.). Ha sido necesario explorar la validez del criterio empleado previamente en el desarrollo del método geométrico al emplear el área de medición del foto-espectrómetro para la elaboración de un coeficiente de medición (C.S.M.), precisamente debido a la imposibilidad de realizar el cálculo de las áreas de color homogéneo de en la mayoría de las zonas de color de ese ejemplar de la muestra.

El procedimiento de comprobación y validación del código de mediciones (C.S.M) del método geométrico, consiste en seleccionar y recortar un sector de la imagen digital de M2 para analizar su histograma.

El tamaño del recorte de la imagen digital de M2 tiene que guardar una relación con la medida que había sido anteriormente usada en la calibración del foto-espectrómetro, al momento de hallar un coeficiente del área de medición del instrumento (C.Píx.).

Dicha aproximación se ha realizado a partir de cotejar la proporción de área total de M2 que representa el coeficiente de medición (C.S.M.) con un recorte de la imagen digital de M2, cuya cantidad de píxeles respecto de la cantidad píxeles de la imagen total de M2, sea equivalente al C.S.M.

Dicho recorte se ha denominado Zc-F4c y se ha realizado en una zona de color no-homogéneo, en el encuentro que agrupa a cuatro zonas de diferentes colores y su imagen contiene 169 píxeles. (Fig.3.13)



**Figura 3.13. Esquema de obtención de Coeficiente de píxeles.**

Una vez realizado dicho recorte de la imagen digital de M2, se ha procedido al análisis de su histograma para obtener su correspondiente coeficiente de píxeles (C.Píx.Zc-F4c).

El análisis se ha realizado tanto para los píxeles RGB como para los píxeles de canal de color. De la igualdad (6), se ha procesado el término de la derecha, en el cual se multiplican dos valores:

- La proporción de la cantidad de píxeles – sean RGB o de un canal de color- del fragmento Zc-F4c recortados dividida entre los píxeles ubicados en la banda del histograma de M2, definido por la intersección de los histogramas de M2 y del fragmento. Sus resultados se consignan en la columna 4 de la tabla 5.
- La proporción de la cantidad de píxeles- sean RGB o de un canal de color- de la banda definida por la intersección de los histogramas de M2 y del fragmento Zc-F 4c, respecto de la cantidad total de píxeles del histograma de la imagen de M2.

A continuación el resultado del coeficiente de píxeles (C.Pix.Zc-F4c) hallado se ha comparado con el coeficiente de medición (C.S.M.) usado en el método geométrico. Los resultados se consignan en la tabla 3.5 y al ser exactamente iguales, se confirman y validan mutuamente.

<b>METODOLOGÍA DE ADQUISICIÓN DE PERFILES DE REFLECTANCIA. VERIFICACIÓN DE COEFICIENTES DE MEDICIÓN (C.S.M.)</b>							
<b>FABERTABLE M2.</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
	<b>Lím izq.</b>	<b>Lím der.</b>	<b>Cant. Píxeles</b>	<b>Zc-F4c /M2 banda</b>	<b>M2- banda/M2 0-255</b>	<b>Coef. Píxeles Zc-F4c (Col. 4 x 5)</b>	<b>C.S.M.</b>
<b>M2-RGB</b>	0	255	106218				<b>0,0016</b>
<b>M2-RGB</b>	72	175	77.655	0,0022	0,7311	0,0016	
<b>Zc-F4c RGB</b>	72	175	169				
<b>M2-Rojo</b>	163	231	53.579	0,0032	0,5044	0,0016	
<b>Zc-F4c Rojo</b>	163	231	169				
<b>M2-Verde</b>	36	167	102.064	0,0017	0,9609	0,0016	
<b>Zc-F4c Verde</b>	36	167	169				
<b>M2-Azul</b>	5	95	102.627	0,0016	0,9662	0,0016	
<b>Zc-fr4c Azul</b>	5	95	169				

**Tabla 3.5. Resultados de la verificación del coeficiente de medición.**

Una vez realizada la comprobación y convalidación del coeficiente de píxeles para el caso del coeficiente de medición del instrumento (C.S.M.), se lo ha utilizado en la comprobación del perfil de reflectancia espectral representativo (P.R.E.R.) de M4, obteniéndose resultados confirmatorios al igual que en los anteriores casos de las muestras M1, M2 y M3.

Al comienzo de este tercer capítulo, se recordaba la importancia del desarrollo de la metodología de adquisición de perfiles espectrales, al ser una etapa condicionante de las siguientes que constituyen el presente trabajo. En la descripción y el análisis de los pasos que componen la metodología, se traduce el énfasis puesto en lograr una aceptable representatividad del perfil o firma espectral de una obra de arte y para nuestro caso las reproducciones que constituyen la muestra.

En los primeros momentos del desarrollo de la metodología de adquisición de perfiles espectrales, pensábamos que era posible obtener perfiles representativos de una categoría de objetos según su sensibilidad al daño por radiación, no simplemente representativos de una obra de arte, sino de un conjunto mayor.

De momento ha quedado claro que esa extensión de la metodología, si bien no debería descartarse como factible, podría ser trivial para el objetivo que se persigue en el presente estudio, que puede definirse como un *ajuste a medida* en la calidad espectral de la emisión de luz que se proyecta sobre cada obra de arte u objeto de exhibición.

Los perfiles obtenidos (P.R.E.R.) para cada una de los ejemplares de la muestra surgen como producto de esta parte del trabajo y se emplean como insumo de las siguientes etapas que se explicarán en los siguientes capítulos.

## **CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE ILUMINANTES CIE Y DE DISEÑO DE LA EMISIÓN ESPECTRAL DE FUENTES. PRESERVACIÓN.**

A continuación se explica el desarrollo de la metodología de selección de la cualidad de emisión de luz que se va a proyectar sobre las obras de arte o los objetos de exhibición, en una primera instancia, que se recorre en este cuarto capítulo, con arreglo al aspecto de *Preservación* de la misión del museo que se considera prioritario siempre que se trata de los bienes culturales.

Uno de los objetivos del presente trabajo se enuncia del siguiente modo: *“desarrollar una Metodología de selección de iluminantes y de fuentes de Iluminación para su uso en la Iluminación de objetos de exhibición y arte, en cumplimiento de las misiones de presentación y preservación del museo”*.

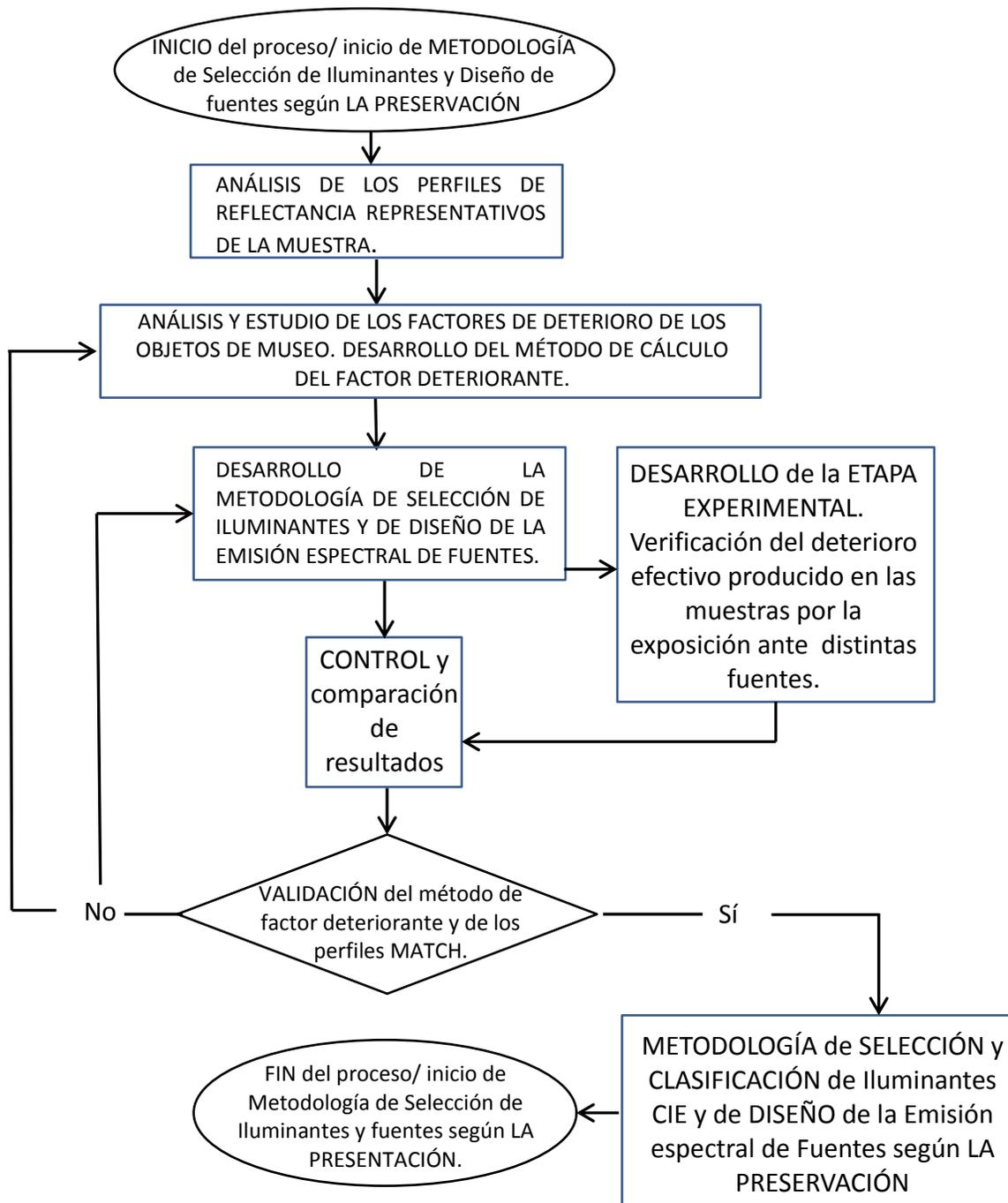
Para cumplir con este objetivo ha sido necesario elaborar un método de selección y evaluación de los iluminantes CIE, de acuerdo al cumplimiento de dos de los aspectos de la misión del museo, la preservación y la presentación [Miller, 2005].

Se ha considerado que al evaluar los iluminantes CIE en su aptitud de cumplir con la misión del museo permitiría primeramente, contar con un menú jerarquizado de perfiles de emisión espectral de iluminantes CIE, susceptibles de ser cargados en un iluminador de emisión regulable y que pudiesen cumplir aceptablemente con las misiones de presentación y preservación al iluminar el objeto muestra.

Alternativamente, evaluar el desempeño de los perfiles de emisión espectral CIE, permite establecer una clasificación y/o categorización de desempeño en el cumplimiento de las misiones de preservación y de presentación, experiencia que resultaría de utilidad para el diseño de una serie de perfiles de emisión espectral a ser cargados y modelados en un iluminador de emisión regulable, capaces de cumplir adecuadamente con la misión del museo.

### **4.1. Metodología de evaluación y selección de iluminantes CIE y de diseño de emisión de fuentes. La preservación.**

Generar una metodología para evaluar y seleccionar iluminantes CIE en función de su capacidad de cumplir con la misión de Preservación del museo, exige relacionar íntimamente algunos conceptos de la física que tienen incumbencia en el proceso de preservar las obras de arte y los objetos de exhibición en museos, tales como la radiación, la reflectancia y el deterioro fotoquímico.



**Fig 4.1. Diagrama de Flujo de la Metodología de Selección de Iluminantes.**

## 4.2. Radiación, Reflectancia y deterioro fotoquímico.

El fenómeno de la radiación consiste en la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas a través del vacío o de un medio material. Si dicha radiación es perceptible por el sistema visual humano (S.V.H), la llamamos luz visible [Coaton et al, 2001].

La reflectancia de un objeto se refiere a la relación entre la potencia electromagnética incidente en su superficie con respecto a la potencia que es reflejada en una interface. El espectro de reflectancia o curva de reflectancia espectral es el gráfico de la reflectividad en función de la longitud de onda [Coaton et al, 2001; IES, 2011].

El daño foto- químico primario es el que se produce en un objeto bajo la incidencia directa de la luz. La oxidación de los materiales de museo por la radiación y la luz (foto-oxidación) involucra una gran variedad de reacciones químicas. Cada una de esas reacciones se produce en diferentes cadenas y ellas, por etapas [Thomson, 2008].

De lo anterior se extrae que dada una potencia de radiación – en la figura 4.2 representada como el perfil del iluminante B de CIE- medida en vatios (W) que incide sobre un perfil de reflectancia espectral –el P.R.E.R de M1- en una determinada longitud de onda; aquella parte de la potencia incidente que sobrepasa al valor de reflectancia dado para dicha longitud de onda, se considera como la potencia de radiación capaz de producir deterioro en el material cuya reflectancia está representada por el perfil de reflectancia espectral, ilustrado en la imagen como el perfil en color rojo (Fig.4.2).

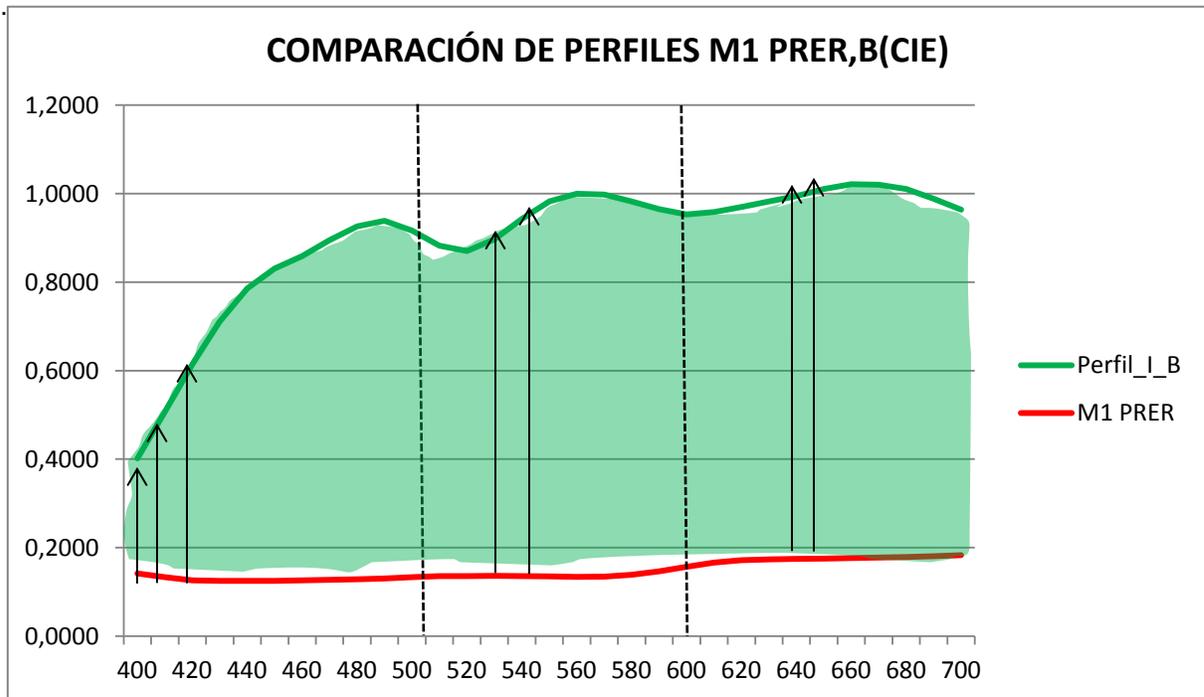


Fig 4.2. Perfil de Emisión del iluminante B (CIE) y P.R.E.R. de M1. Comparación.

Dicha potencia de radiación que se considera excedente al valor de reflectancia y por ende, aplicada durante una unidad de tiempo se convierte en la energía susceptible de producir daño en el objeto sobre el que incide, se representa en la figura 15 con las flechas de color negro. De acuerdo a su magnitud y en relación directa a ella será su capacidad de producir daño, pero también es un factor de su capacidad de daño, la zona del espectro electromagnético en el que se sitúa su energía.

En el espectro electromagnético, la onda energética tiene una mayor perturbación cuanto menor es su longitud [Thomson,2008]. En todo el espectro y específicamente en la parte visible del mismo, desde los 400 a los 700 nanómetros, que es la zona en la que se circunscribe el presente estudio, la energía productora de daño fotoquímico será calificada y ponderada tomando en cuenta su ubicación además de su magnitud para evaluar su capacidad de producir daño en el objeto sobre el que incide, en un importante paso de la metodología de selección de iluminantes, cual es el desarrollo del *factor deteriorante*.

4.2. En vista de lo anterior, se ha desarrollado un método de evaluación de los iluminantes CIE consistente en lo siguiente:

4.2.1. Seleccionar los perfiles de iluminantes más cercanos y/ o coincidentes en su forma a la del Perfil de Reflectancia Espectral Representativa (P.R.E.R.) de la muestra que se desea iluminar. En el caso ilustrativo de la figura 7, la muestra es M1, la reproducción del Mondrian 1921 y los iluminantes CIE que han sido seleccionados según el criterio de preservación son Iluminante A e Iluminante B.

4.2.2. Descartar los perfiles de iluminantes CIE cuya forma acuse saltos y/o pronunciadas variaciones en favor de aquellos cuya forma es más suavizada entre valles y picos, debido a que el daño por absorción de energía en objetos es sensible a lo determinado por tales picos y/o grandes saltos energéticos, aspecto que se agudiza en función de la menor longitud de onda en la que pueden llegar a producirse [Miller, 2005; Thomson, 2008].

4.2.3. De entre los perfiles seleccionados con el criterio arriba descrito, establecer un ranking de preferencia en función del menor desfase de potencia existente en el rango de los azules del espectro de su potencia de emisión, atendiendo a que la energía en su expresión como onda electromagnética es inversamente proporcional en su capacidad de perturbación respecto de su longitud de onda y consecuentemente, en el tramo de los 400nm a 500nm. es donde se encuentran los mayores riesgos de daño por absorción energética para la muestra u obra a ser iluminada [Miller, 2005; Thomson, 2008]. De acuerdo a lo anterior, en una comparación preliminar entre los dos Iluminantes CIE seleccionados de acuerdo a un criterio de preservación, se considera que el Iluminante A (CIE) se considera mejor clasificado que el Iluminante B (CIE), debido a que el desfase de potencia en la zona de mayor sensibilidad de 400nm. a 500nm es menor en este iluminante respecto del P.R.E.R de la muestra M1, pero en todo caso se debe cuantificar esa evaluación para poder dar una definición cuantificada de toda evaluación, lo que se logra mediante el cálculo del factor deteriorante.

### **4.3 El Cálculo del Factor deteriorante.**

Una vez que se han dejado establecidas las relaciones existentes entre el deterioro de los objetos de exhibición, el perfil de reflectancia de su/s superficie/s y el perfil de emisión de una fuente o en su defecto, la teórica emisión espectral de un iluminante; ha sido necesario desarrollar un método

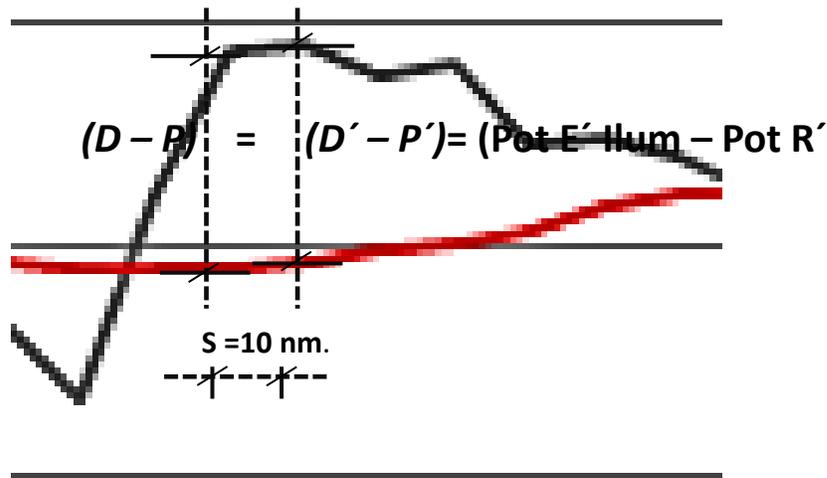
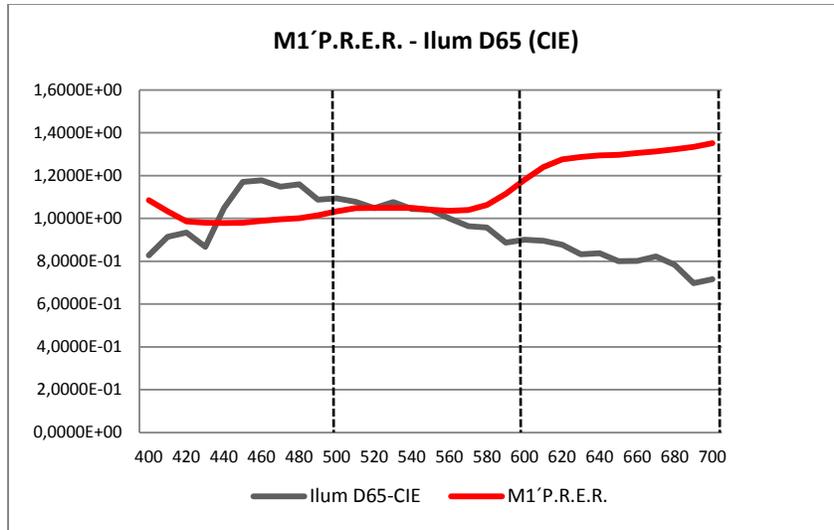


Figura 4.3. Diagrama para el cálculo del factor deteriorante.

de cálculo que tome en cuenta dichas relaciones y nos permita obtener una cuantificación del potencial deteriorante que una emisión espectral dada, sea ésta de carácter teórico al pertenecer a un iluminante CIE o bien empírica de una fuente, tiene sobre el objeto de exhibición en el que se proyecta.

El cálculo del factor deteriorante es nuestra respuesta para dicha pregunta e implica el análisis simultáneo de dos perfiles espectrales. Por una parte el perfil de emisión espectral de una fuente o alternativamente, el perfil espectral de un iluminante CIE y por otra, el perfil de reflectancia espectral representativo de una determinada muestra. Hacer el análisis y comparación de ambos perfiles supone ponerlos en escala, de modo que sus valores sean comparables.

Para poner en escala ambos perfiles, se ha decidido por un método consistente en hallar el promedio de la potencia de cada uno de los perfiles espectrales. Luego de hallar dichos promedios, mediante la división del mayor entre el menor de ellos, se obtiene un factor al que llamamos de

escala, que debe ser multiplicado por las potencias del perfil que tenga un menor promedio de potencia, para ponerlo en escala con el otro perfil con el que se está comparando.

En el caso ilustrativo, comparamos el perfil espectral del Iluminante CIE D65 con el perfil de reflectancia espectral representativo de la muestra M1. Luego de ponerlos en escala a ambos, se hace evidente en su entrecruzamiento la magnitud y la ubicación de la potencia de emisión excedente, la que se considera generadora del factor deteriorante, el cual le corresponderá al iluminante o la emisión diseñada que se analiza antes de iluminar con ella la muestra M1 (Fig.4.3).

El factor deteriorante será el valor sumado de todas y cada una de las potencias irradiadas que sean excedentes al valor de reflectancia del perfil de reflectancia (P.R.E.R.) de la muestra analizada en todas las longitudes de onda del espectro electromagnético tomadas en un step de 10 nanómetros desde los 400 a 700 nanómetros.

En nuestro ejemplo se analizan y se comparan dos perfiles espectrales: el Perfil de Reflectancia Espectral Representativo (P.R.E.R.) de la muestra M1 y el Perfil de Emisión Espectral (P.E.E.) del Iluminante CIE D65 (Fig.4.3)

Ese valor obtenido toma para su adición, solamente los valores excedentes de potencia del perfil de emisión sobre el valor de reflectancia para cada longitud de onda, de acuerdo a un step de 10 nanómetros.

Luego los valores obtenidos se suman y se ponderan de acuerdo a su ubicación en el espectro electromagnético, ya que se toma en cuenta el grado de perturbación de la onda electromagnética, el cual es indirectamente proporcional a su longitud [Thomson, 1994; Miller, 2005; Thomson, 2008].

Esto último ha hecho necesaria una subdivisión de la parte del visible del espectro que se analiza en el presente estudio, en tres zonas diferentes que implican el uso de tres diferentes coeficientes  $\alpha_j$ , empleados para ponderar la magnitud del excedente de potencia de cada área, en función de la zona del espectro electromagnético en la que se ha producido.

Dichas áreas y sus correspondientes coeficientes de ponderación, que se detallan en las expresiones (7) y (8), son las que dan cuenta del factor deteriorante (F.D.).

La formulación del algoritmo de cálculo considerado en este trabajo es:

$$n = \frac{\lambda_n - \lambda_0}{h}; \quad h = \lambda_{i+1} - \lambda_i = 10$$

$$j = 1 \dots k; \quad A_j = \sum_{i=0}^n \left[ \frac{(D(\lambda_i) - P(\lambda_i)) + (D(\lambda_{i+1}) - P(\lambda_{i+1}))}{2} \right] (\lambda_{i+1} - \lambda_i) \quad \text{si } D > P$$

$$A_T = \sum_{j=0}^k A_j \alpha_j$$

Donde:

$\lambda_0$  : Longitud de onda inicial del área  $A_j$  ;  $j = 1, 2, \dots, k$ .

$\lambda_f = \lambda_n$  : Longitud de onda final del área  $A_j$  ;  $j = 1, 2, \dots, k$ .

$n$  = El paso es  $h=10$

$k$  = Número de áreas calculadas.

$D$  = Perfil de emisión espectral del iluminante o fuente.

$P$  = Perfil de Reflectancia Espectral Representativo (P.R.E.R) de una muestra multiplicado por un coeficiente de escala.

$A_T$  = Área total de la potencia espectral excedente al valor de reflectancia del P.R.E.R. de una muestra.

$A_j$  = Área de la potencia espectral excedente al valor de reflectancia del P.R.E.R. para un tramo de longitud de onda dado.

$\alpha_j$  ;  $j = 1, \dots, k$ . Coeficiente de ponderación de las áreas de potencia espectral excedente a la reflectancia en función de la zona del espectro en la que se encuentra:

$$j = 1 ; A_1 ; \alpha_1 = 1 ; \lambda_0 = 400 \text{ nm.} ; \lambda_f = 500 \text{ nm.}$$

$$j = 2 ; A_2 ; \alpha_2 = 0,75 ; \lambda_0 = 501 \text{ nm.} ; \lambda_f = 600 \text{ nm.}$$

$$j = 3 ; A_3 ; \alpha_3 = 0,10 ; \lambda_0 = 601 \text{ nm.} ; \lambda_f = 700 \text{ nm.}$$

La metodología en desarrollo debe entre otros requisitos, probar su utilidad para predecir, evaluar y clasificar el desempeño de los iluminantes CIE y de las emisiones espectrales diseñadas para uso en una fuente de emisión regulable, en cuanto a su adecuado cumplimiento de la misión de preservación de la iluminación de museos.

El factor deteriorante se propone como un instrumento a ser empleado como un valor indicativo del deterioro que eventualmente produce una determinada emisión espectral que se proyecta sobre un objeto en exhibición.

El factor hallado, deberá operarse en conjunción con otras variables a ser consideradas en términos de la preservación, por ejemplo el tiempo y las condiciones higrotérmicas de exposición. Un instrumento para uso de los curadores en la búsqueda de una administración informada y de precisión del deterioro inevitable que se produce en toda exposición.

La etapa experimental se ha diseñado tomando en consideración entre otros elementos, el cálculo de factor deteriorante, que luego se ha comparado con los resultados de deterioro empíricamente obtenidos luego de la exposición comparada de una muestra bajo tres tipos diferentes de

lámparas, obteniéndose una primera validación de su capacidad predictiva. En dicho capítulo y en el de estudios futuros, se exploran las posibilidades de continuar su estudio y refinamiento.

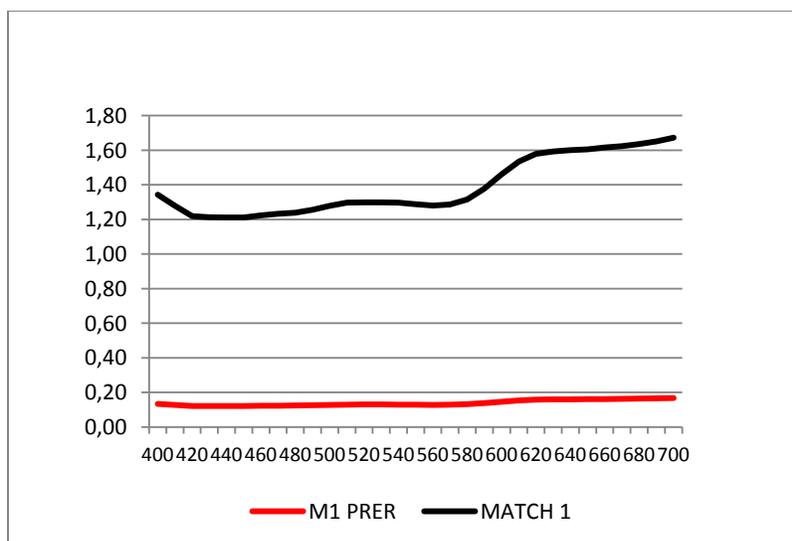
#### **4.4. Diseño de la emisión espectral de una fuente.**

La metodología también implica la capacidad de diseñar el perfil, ya sea de un iluminante o bien de una emisión espectral de fuente, que sea susceptible de ser usado en el iluminador de emisión regulable y que además presente un adecuado desempeño en el cumplimiento de los aspectos de preservación y de presentación de la misión del museo.

Se ha procedido al diseño del perfil de una emisión espectral a partir del Perfil de Reflectancia Espectral Representativa de cada una de las muestras (M1, M2, M3 y M4), cuya forma es idéntica y coincidente con la del P.R.E.R. de la muestra de la que procede. Dicho perfil se ha procesado mediante la dotación de una potencia de emisión. El valor de dicha potencia de emisión es un valor asignado equivalente al promedio de las potencias de emisión de todos los perfiles de emisión de los iluminantes CIE (Fig.4.4).

Al perfil de emisión diseñado de esta manera se ha dado en llamar MATCH 1,2,3 ó 4, de acuerdo al número de la muestra de la cual procede. La razón principal que ha llevado a su diseño ha sido el análisis del rendimiento en la función de preservación, de los iluminantes CIE. Un análisis de la clasificación de los iluminantes CIE en función de sus resultados de factor deteriorante, lleva a la conclusión de la necesidad de diseñar un perfil que al menos en teoría, tenga un factor deteriorante nulo o equivalente a cero.

Efectivamente, para cada uno de los perfiles MATCH y de la muestra de la que procede, las formas exactamente idénticas de sus perfiles espectrales se vuelven coincidentes una vez que se ponen en escala. Al no existir en ninguna de sus partes, un excedente de potencia del perfil de emisión por encima del valor de reflectancia del perfil de reflectancia de la muestra, se infiere que al menos de manera teórica, el perfil MATCH correspondiente a la muestra de la que procede sería el perfil de emisión de una fuente, que en caso de usarse para la iluminación de esa muestra, susceptible de producir el menor o ningún efecto deteriorante por iluminación en el objeto de exhibición (Fig.4.4a ;4.4b).



**Figura 4.4a. P.R.E.R. de M1 y MATCH 1, sin escala.**

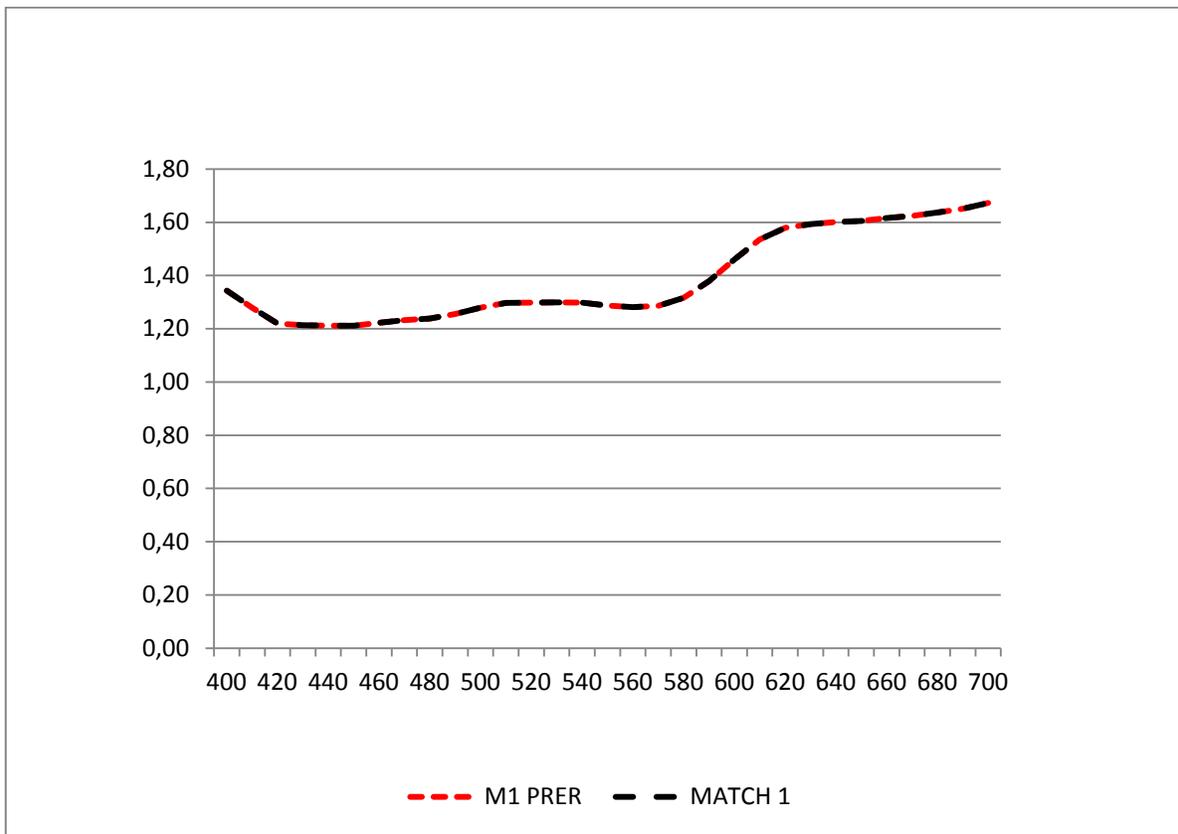


Figura 4.4b. P.R.E.R. de M1 y MATCH 1, en escala

Luego de diseñar los cuatro perfiles de emisión MATCH, se ha calculado su factor deteriorante y se les ha hecho parte de la clasificación y categorización de los perfiles de iluminantes y de emisiones espectrales según el aspecto de preservación de la misión del museo.

En los capítulos sucesivos, se continua con el análisis de los mismos iluminantes y emisiones espectrales, en función del aspecto de presentación de la misión del museo, para evaluar si además de cumplir con el requisito de ayudar a la conservación de la obra de arte, es lo suficientemente apta para una adecuada percepción de la obra de arte o del objeto de exhibición.

#### 4.5. Clasificación de los iluminantes CIE y de las emisiones espectrales diseñadas según su factor deteriorante.

Con ayuda de la metodología antes explicada, se ha obtenido una clasificación de los Iluminantes CIE y de la emisión espectral diseñada a partir del perfil de reflectancia espectral representativo (P.R.E.R.) de las muestras M1 a M4, según su desempeño en la misión de preservación de la iluminación de museos.

El ordenamiento de la clasificación de los iluminantes CIE y de las emisiones espectrales se ha realizado con base en una lógica de mejor posicionamiento según un menor valor de factor deteriorante calculado. El factor deteriorante (F.D.) de un iluminante o de una emisión espectral se obtiene cuando se los analiza contra el perfil de reflectancia espectral representativa (P.R.E.R.) de la muestra a ser iluminada. Los análisis se han realizado y posteriormente se han ordenado los

resultados de clasificación para cada una de las muestras, como se muestra en las tablas 4.1 a 4.4.

<b>CLASIFICACIÓN DE ILUMINANTES CIE Y MATCH 1 para M1 según FACTOR DETERIORANTE</b>		
<b>N°</b>	<b>ILUMINANTE CIE/ FUENTE</b>	<b>FACTOR DETERIORANTE</b>
1	<b>MATCH 1</b>	<b>0,00</b>
2	A	11,35
3	B	12,63
4	E	15,03
5	D 50	15,90
6	F11	17,43
7	F2	27,04
8	D65	29,30
9	C	31,05
10	F7	37,99
11	D75	39,38

**Tabla 4.1. Clasificación de Iluminantes CIE y MATCH1 para M1**

<b>CLASIFICACIÓN DE ILUMINANTES CIE Y MATCH 2 para M2 según FACTOR DETERIORANTE</b>		
<b>N°</b>	<b>ILUMINANTE CIE/FUENTE</b>	<b>FACTOR DETERIORANTE</b>
1	<b>MATCH 2</b>	<b>0,00</b>
2	A	16,32
3	F11	19,05
4	B	27,41
5	D 50	29,58
6	E	34,05
7	F2	36,32
8	D65	47,00
9	C	48,27
10	F7	52,91
11	D75	57,39

**Tabla 4.2. Clasificación de Iluminantes CIE y MATCH 2 para M2**

De esta manera, queda establecida la clasificación de los perfiles de iluminantes y de las emisiones espectrales de un iluminador de museos, para cada una de las muestras. En cada caso el ordenamiento se ha hecho de acuerdo al menor valor de factor deteriorante que le corresponda al perfil del iluminante o de la emisión espectral.

<b>CLASIFICACIÓN DE ILUMINANTES CIE Y MATCH 3 para M3 según FACTOR DETERIORANTE.</b>		
<b>N°</b>	<b>ILUMINANTE CIE/ FUENTE</b>	<b>FACTOR DETERIORANTE</b>
1	<b>MATCH 3</b>	<b>0,00</b>
2	A	11,78
3	F11	18,60
4	B	22,12
5	D 50	23,29
6	E	29,60
7	F2	34,06
8	D65	42,58
9	C	43,63
10	F7	47,37
11	D75	53,78

**Tabla 4.3. Clasificación de iluminantes CIE y MATCH 3 para M3**

<b>CLASIFICACIÓN DE ILUMINANTES CIE Y MATCH 4 para M4 según FACTOR DETERIORANTE.</b>		
<b>N°</b>	<b>ILUMINANTE CIE/ FUENTE</b>	<b>FACTOR DETERIORANTE</b>
1	<b>MATCH 4</b>	<b>0,00</b>
2	E	9,33
3	B	10,28
4	D 50	10,61
5	F11	17,31
6	A	17,42
7	D65	17,88
8	C	22,37
9	D75	25,79
10	F7	28,72
11	F2	31,71

**Tabla 4.4. Clasificación de iluminantes CIE y MATCH 4 para M4**

Para todos y cada uno de los perfiles de reflectancia representativos (P.R.E.R.) de las muestras (M1, M2, M3 y M4), analizadas contra los perfiles de iluminantes CIE y el de emisión espectral diseñada, el perfil que se ha clasificado como número uno en el cumplimiento del aspecto preservación, o sea aquel que ha obtenido el menor factor deteriorante (F.D.), ha sido el perfil MATCH de la propia muestra analizada, cuyo perfil de reflectancia espectral se había usado para diseñarlo. Se considera, al menos desde un punto de vista teórico, que al haber coincidencia en su forma y en sus valores de potencia una vez puestos en escala, y al no haber un excedente de potencia de emisión sobre un valor de reflectancia espectral en ninguna longitud de onda de la porción del espectro electromagnético estudiada, hay condiciones para un mínimo, virtualmente nulo deterioro por iluminación en la muestra expuesta. El factor deteriorante (F.D.) en esos casos es equivalente a cero [Coaton et al 2001].

Para cada muestra, se han seleccionado otros dos iluminantes que obtienen el segundo y tercer mejor resultado que configuran junto al perfil de emisión MATCH, los tres perfiles de emisión espectral que menor daño producirían en una muestra, en caso de iluminarla luego de ser introducidos y modelados en un iluminador de emisión regulable.

La metodología de selección de iluminantes y de diseño de emisión espectral desarrollada en su aspecto de preservación de la obra de arte exhibida queda explicada en este capítulo. Se basa en la conjunción de las características físicas de la superficie material de las obras de arte pictórico exhibidas - específicamente su reflectancia - con la cualidad espectral de la emisión de luz que se proyecta sobre la obra para su exhibición.

En su aspecto de preservación, la metodología provee de una lógica y también de un método de cálculo para pronosticar el deterioro que una determinada emisión espectral proveniente de una fuente puede causar en una obra de arte. La validación del cálculo de factor deteriorante (F.D.) mediante su verificación experimental, ha estado en la génesis de la fase experimental de este estudio, que se desarrolla en el capítulo seis.

## **CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE ILUMINANTES CIE Y DE DISEÑO DE LA EMISIÓN ESPECTRAL DE FUENTES. PRESENTACIÓN.**

El presente capítulo es continuidad del anterior, no sólo en el orden sino en lo temático. Una vez que el aspecto de la preservación ha sido abordado en el desarrollo de la metodología, es necesario saber si los requisitos de la presentación se satisfacen con la elección de una cierta emisión espectral en la iluminación que se proyecta sobre una obra de arte u objeto de exhibición.

Como hemos visto, presentación y preservación son aspectos complementarios dentro del criterio de equidad con el que suelen tratarse los bienes culturales. Una adecuada presentación tiene que ver con la posibilidad de las generaciones actuales de disfrutar del patrimonio cultural, mientras que la preservación protege no sólo el objeto sino el derecho de las generaciones por venir, al disfrute de ese mismo patrimonio.

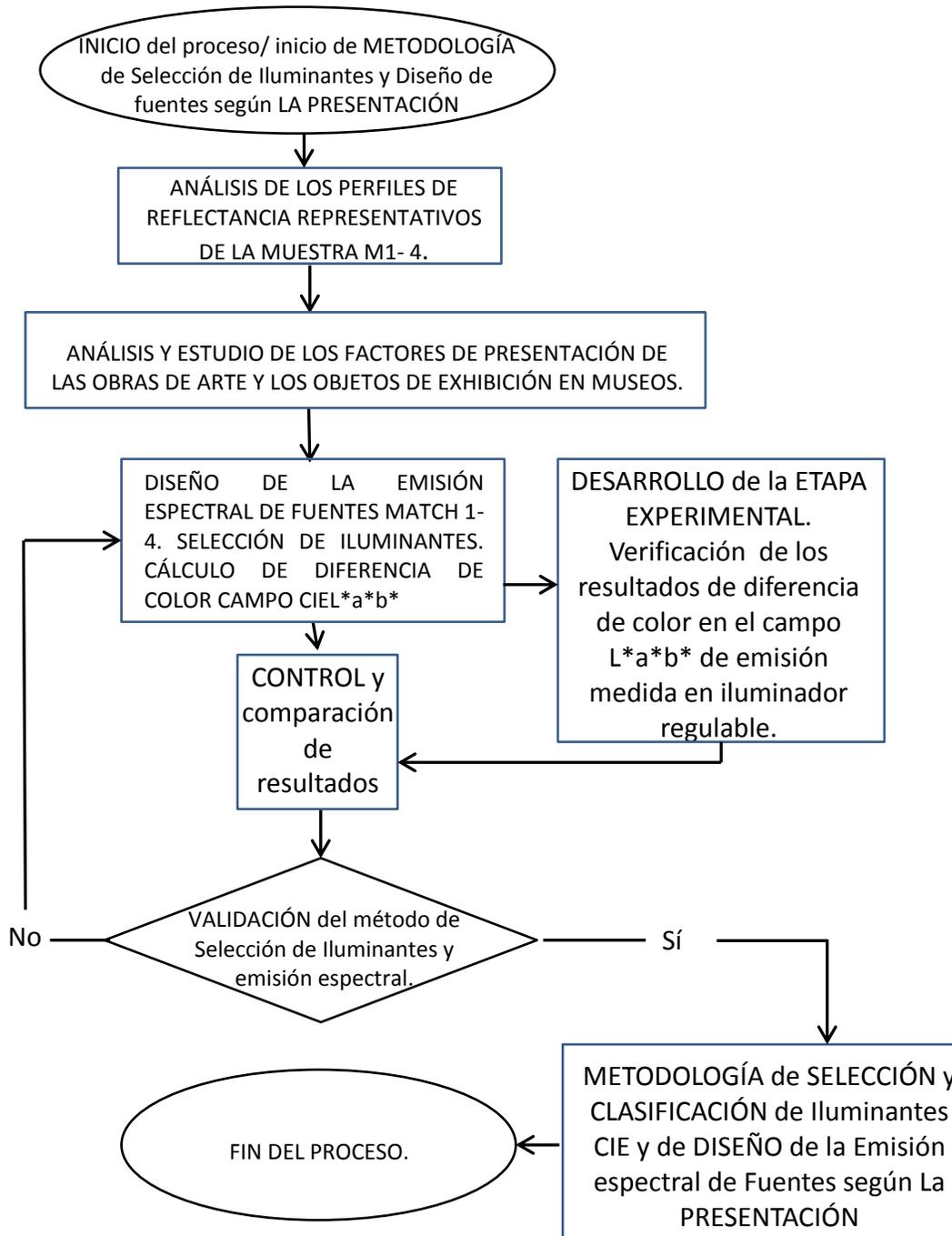
### **5.1 Presentación y visión de objetos de exhibición en museos.**

El desarrollo de una metodología de selección de iluminantes y de diseño de la emisión espectral de fuentes, en cuanto al aspecto de presentación de la misión del museo, supone algunas consideraciones acerca del aspecto mismo de la misión, para mejor comprender los parámetros que deben tomarse en cuenta en la evaluación.

Se ha dicho de la misión del museo, que su función primaria consiste en que mediante una adecuada presentación, el público vea y aprecie los objetos exhibidos. De acuerdo al manual de IESNA, institución rectora para temas de Iluminación en Norteamérica, se reconocen cuatro modalidades de exhibición en museos: a) planas en superficies verticales (pinturas sobre muros); b) cajas de exhibición (objetos que por tamaño o rareza lo demanden); c) objetos tri-dimensionales (esculturas) y; d) ambientes realistas [IES, 2011].

Para que la función de presentación se cumpla cabalmente, se sigue el principio de mínima distorsión, el cual establece que se debe asegurar las condiciones ambientales en general, y de iluminación en particular, para que la obra de arte se perciba de modo fiel a la intención inicial del autor [Torres Portero et al., 2008].

A pesar de ser un sistema complejo y flexible, el ojo humano no determina por sí sólo, qué o cómo vemos. Esto más bien tiene que ver con el cerebro y su interpretación de la información que ingresa a través del ojo. Un amplio rango adaptativo es provisto por el ojo a través de dos tipos de receptores llamados bastones y conos que se encuentran en la retina, cumpliendo las funciones de sensor del estímulo percibido [Miller, 2005; Colombo & O'Donnell, 2010].



**Figura 5.1. Diagrama de flujo de la metodología de selección de Iluminantes y diseño de emisión espectral de fuentes en función del aspecto presentación de la misión del museo**

Los bastones de la retina humana operan bajo condiciones de baja luminosidad y hay tres tipos de conos cuya sensibilidad es mayor a una cantidad alta de iluminación. Las salidas de varios bastones adyacentes suelen converger a una única neurona, lo que aumenta la sensibilidad a la intensidad luminosa de este tipo de células pero reduce su capacidad de resolver detalles, también llamada agudeza visual [Miller,2005; Colombo & O'Donnell,2010].

Para la visión en condiciones de alta iluminación, también llamada *fotópica* ( $L > 10 \text{ cd/m}^2$ ), el ojo es capaz de proveer información para la imagen y el color, en condiciones de baja iluminación, sólo es posible distinguir forma y movimiento sin percepción de color, lo que recibe el nombre de *visión escotópica* ( $L < 10^{-3} \text{ cd/m}^2$ ). A la transición entre ambos tipos de visión se le llama *mesópica* [CIE,2004; Miller,2005; IES, 2011].

En la actualidad, los objetos categorizados como frágiles y/o muy susceptibles al daño por iluminación, debido a las restricciones de nivel para su iluminación, deben ser observados en el rango de visión mesópico [IES, 2011]. La adaptación a la oscuridad, es la capacidad del sistema visual humano de pasar de una visión fotópica a una escotópica y toma tiempo para producirse ya que en un organismo sano y joven exige un lapso en el rango de los treinta a cuarenta y cinco minutos. En personas de la tercera edad, estos tiempos se alargan aún más. En la iluminación de museos es de suma importancia tener en cuenta estos fenómenos debido a los niveles bajos de iluminación que por razones de preservación y conservación deben emplearse en los objetos altamente sensibles al deterioro por iluminación [Miller,2005].

En condiciones de baja iluminación, se debe favorecer el contraste entre fondo y objeto, ya que es la agudeza visual llega a su límite en tales condiciones de visión [Colombo & O'Donnell, 2010]. Por la misma razón es necesario proveer del suficiente tiempo de recorrido para permitir la adaptación del usuario a niveles bajos de iluminación [Miller,2005]. También debe mantenerse un balance equilibrado de niveles de iluminación entre las distintas áreas de exposición para evitar la necesidad de nuevas y sucesivas adaptaciones que pueden llegar a disminuir sensiblemente la capacidad de ver adecuadamente y por ende, de una buena presentación [Miller,2005; Cuttle, 2007].

Por otra parte, el sistema visual humano (S.V.H.) no sólo se caracteriza por ver en color en condiciones fotópicas de iluminación, sino que además tiene la habilidad única de realizar una adaptación cromática a la luz, cuando ésta contenga distorsiones en su balance de color, sea por su paso a través de vidrios y/o filtros de color o bien debido al contenido espectral de sus emisiones. El cerebro corrige la visión del color compensando sus valores de modo de reconfigurar una visión aproximadamente normal, que reduce la percepción del desbalance real de colores presentes en la luz [Miller, 2005; Cuttle 2007].

La luz natural es la que mejor reproducción de color ofrece, debido a que es la luz bajo la que ha evolucionado la visión humana. En razón de esa misma evolución, también por su temperatura de color y por su carácter cambiante es la que mejores condiciones de agudeza visual, percepción del color y confort visual ofrece a la visión humana. El índice de fidelidad con el que una lámpara de luz artificial permite una adecuada percepción de color es el C.R.I. (Colour Rendering Index) [IES, 2011].

Por otra parte, las diferentes combinaciones posibles entre las características de transparencia u opacidad de un objeto y entre el tipo de reflexión de la luz, pueden tener consecuencias no deseadas de iluminación, si se producen brillos no deseados, producidos por el ángulo de la reflexión o por efecto de la transparencia del objeto, que eventualmente produzcan deslumbramientos y otras afecciones al confort visual. En circunstancias en las que no se prevén tales fenómenos, simplemente no permitirán una adecuada presentación del objeto exhibido [Miller,2005; Cuttle,2007].

Asimismo, existe en cuanto al confort visual existe el riesgo de deslumbramiento. Es producido por el ingreso de luz al interior del ojo humano, de un nivel comparativamente alto con la adaptación

que la retina y el sistema visual tienen a un determinado momento, lo que produce una ceguera temporal inmediata y fuerza al ojo a una adaptación desde el nivel de iluminación máximo registrado hacia un nuevo y más bajo nivel de iluminación promedio. Cuanto más bajos sean estos niveles promedio de iluminación y cuanto mayor sea el diferencial de nivel a salvar mediante la adaptación visual, mayor será el tiempo necesario para su completamiento [Miller,2005; Cuttle, 2007; Thomson,2008]. Las causas del deslumbramiento son varias: rayos de luz que vienen de fuentes directas situadas en el fondo o al lado de un objeto exhibido en un contexto de niveles de iluminación más bajos o por reflexión en superficies altamente reflectantes, entre ellas incluso otros objetos de exhibición y más frecuentemente, las partes metálicas y superficies altamente reflectantes del propio edificio [Miller,2005; Cuttle, 2007; Thomson,2008].

En resumen, de todas las condiciones a tomar en cuenta para lograr una adecuada presentación de una obra de arte, que sean pertinentes al desarrollo del presente estudio, se ha considerado el análisis del estímulo visual como la instancia clave que nos permita anticiparnos una noción de las condiciones de buena o mala visión que se produce en la conjunción de un objeto iluminado bajo una determinada emisión espectral.

## **5.2 Diseño de la emisión espectral de una fuente de uso en museos.**

En el capítulo precedente se ha analizado el comportamiento de los iluminantes CIE en función del aspecto preservación de la misión de museo y se ha complementado dicho análisis con el diseño de la emisión espectral de una fuente, en perfiles de emisión espectral denominados MATCH 1 al 4, según derivasen en su diseño del perfil de reflectancia espectral representativo (P.R.E.R.) de cada una de las muestras de reproducciones de obras de arte. En el presente capítulo se ha hecho el análisis del comportamiento de los perfiles de emisión diseñados (MATCH 1-4) en relación con el aspecto presentación de la misión del museo. Los resultados de dicha evaluación se consignan en las tablas 1 a 8, según la ubicación que le corresponde a cada uno de los iluminantes CIE y a las emisiones espectrales diseñadas, de acuerdo al menor valor de diferencia de color obtenido al ser comparado con el iluminante D65.

## **5.3 Evaluación de Iluminantes CIE y de emisión espectral de fuentes según la diferencia de color producida por el estímulo visual.**

Se plantea la exigencia de evaluar a los iluminantes CIE y a los perfiles de emisión espectral, en su capacidad de cumplir adecuadamente la función de presentación. En la última parte de la hipótesis, lo anterior se expresa de la siguiente manera:

*“El estímulo visual resultante de la interacción producida entre el Perfil de Emisión Espectral de la fuente, en nuestro caso el iluminador de emisión regulable y el Perfil de Reflectancia Espectral Representativo del objeto (P.R.E.R.) permita una reproducción de color adecuada para el buen cumplimiento de la función de Presentación.*

El planteo de cómo evaluar si el color percibido mediante la selección y/o modelación de la emisión espectral de un Iluminante sea éste proveniente de la selección de iluminantes CIE o sea de la emisión espectral específicamente diseñada como MATCH 1-4, ha sido el siguiente:

- a) Tomar como referencia el iluminante D65, ya que es el iluminante que se emplea más amplia y extensamente para mediciones de color y multiplicarlo por el Perfil de Reflectancia Espectral Representativa (P.R.E.R.) del Objeto, obteniendo con ello el Estímulo Visual para nuestro objeto iluminado con D65, o sea aún sin tomar en consideración la preservación, simplemente la presentación, a sabiendas que el perfil espectral del Estímulo Visual de un objeto iluminado

- bajo un D65 nos da la referencia de una buena reproducción de color. [CIE,2006; CIE,2007; CIE,2009; CIE,2011; CIE,2014].
- b) Realizar el cálculo y la comparación de las coordenadas cromáticas y luego de la diferencia de color perceptible y aceptable según normas de CIE en el campo de color CIE L\*a\*b\* para los colores presentes en la muestra, primero iluminados con el D65 y comparados luego con todos y cada uno de los perfiles de iluminantes CIE. [CIE,2006; CIE,2007; CIE,2009; CIE,2011; CIE,2014].
  - c) Posteriormente, realizar los cálculos de la misma comparación de diferencia de color en el campo CIEL\*a\*b\* de los colores de la muestra, primero iluminados con el iluminante D65, comparados con esos mismos colores de la muestra iluminados con la emisión espectral diseñada MATCH 1 a 4 según corresponda a la muestra analizada. [CIE,2006; CIE,2007; CIE,2009; CIE,2011; CIE,2014].

5.3.1 Resultados de la diferencia de color en el campo CIEL\*a\*b\* calculados y experimentales.

La evaluación según el aspecto de presentación de la misión del museo se ha hecho en dos instancias diferentes. La primera consiste calcular la diferencia de color en el campo CIEL\*a\*b\* del estímulo visual producido por los colores de una muestra bajo un cierto iluminante o emisión espectral diseñada, siempre en comparación a los mismos colores bajo el iluminante D65.

De dichos cálculos, surge una clasificación de Iluminantes CIE y de las emisión espectrales MATCH 1-4 de acuerdo a la menor diferencia de color obtenida en su utilización para iluminar una muestra (Tablas 5.1 a 5.5). Se consignan además la tabla de valores de perceptibilidad y de aceptabilidad dadas por la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) para las diferencias de color obtenidas para el campo de color CIE L\*a\*b\*. [CIE,2011; CIE,2014].

Al realizar la clasificación de iluminantes CIE y de emisiones espectrales diseñadas en función del aspecto presentación de la misión del museo, se ha tomado como parámetro la categoría de Tolerancia Estricta de Aceptabilidad industrial dada por CIE [CIE,2004; CIE,2011; CIE,2014].

Según CIE, el cambio de color medido en un determinado campo (en este caso L\*a\*b\*) es perceptible a partir del umbral dado por un desplazamiento cuya longitud sea mayor a uno, en el mismo campo de color. Por encima del valor uno de desplazamiento, la diferencia entre colores es perceptible, al menos desde sus variables psicofísicas, lo que da lugar al parámetro de perceptibilidad [CIE,2006; CIE,2007; CIE,2009; CIE,2011; CIE,2014].

Complementariamente, para fines de control de calidad en la producción industrial, se establece el parámetro llamado de aceptabilidad. Consiste en una graduación de tolerancias de perceptibilidad, que se consideran aceptables en la medición de color de objetos de producción seriada, comparados simultáneamente (Tabla 5.1) [CIE,2006; CIE,2007; CIE,2009; CIE,2011; CIE,2014].

Los valores de diferencia de color en el campo L\*a\*b\* superiores a tres (> 3), es decir aquellos que están por fuera de los permitidos para la Tolerancia Estricta de Aceptabilidad industrial, se han escrito en color rojo en el casillero correspondiente y en tal caso, su desempeño pasa a la categoría de Tolerancia Normal o de Gran Tolerancia (Tabla 5.1) [CIE,2006; CIE,2007; CIE,2009; CIE,2011; CIE,2014].

PERCEPTIBILIDAD Y ACEPTABILIDAD (CIE)	
DIFERENCIAS PERCEPTUALES	CIELAB
(Threshold) Diferencia apenas notoria.	0,38 -0,73 (< 1)
Diferencia por encima del umbral.	1,75 ( ~ 2)
Gran diferencia de color.	5
DIFERENCIAS ACEPTABLES (TOLERANCIA INDUSTRIAL)	
Tolerancia Estricta.	1,1 - 2,8 (< 3)
Tolerancia Normal.	2,8 - 5,6 (3 - 6)
Gran tolerancia.	>5,6 (> 6)

**Tabla 5.1. Perceptibilidad y aceptabilidad CIE.**

SELECCIÓN DE ILUMINANTES CIE SEGÚN MENOR DIFERENCIA DE COLOR CIEL*a*b* PARA M1				
Resultados Diferencia de Color		M1	M4	M14
(CIE, 1931) Iluminantes CIE- D65		Rojo	Amarillo	Azul
1	ILUMINANTE F7 -D65	0,88	0,24	0,46
2	ILUMINANTE C -D65	0,87	0,70	0,61
3	ILUMINANTE D75 -D65	1,17	1,21	0,82
4	ILUMINANTE B -D65	2,23	2,11	1,41
5	ILUMINANTE D50 -D65	2,43	2,34	1,66
6	<b>MATCH 1</b>	3,22	2,70	1,39
7	ILUMINANTE F2 -D65	3,78	1,40	2,23
8	ILUMINANTE F11 -D65	5,61	4,70	2,68
9	ILUMINANTE A -D65	6,58	5,40	4,02

**Tabla 5.2. Selección de Iluminantes CIE según menor diferencia de color para M1.**

SELECCIÓN DE ILUMINANTES CIE SEGÚN MENOR DIFERENCIA DE COLOR CIEL*a*b* PARA M2.					
Resultados Diferencia de Color		M2	M2	M2	M2
(CIE, 1931) Iluminantes CIE- D65		19	47	b 20	c 12
1	ILUMINANTE C -D65	0,36	0,43	0,08	0,36
2	ILUMINANTE D75 -D65	0,43	0,79	0,52	0,49
3	ILUMINANTE F7-D65	0,45	0,30	0,57	0,28
4	ILUMINANTE B -D65	0,87	1,39	1,19	0,81
5	ILUMINANTE D50 -D65	0,92	1,53	1,05	0,97
6	ILUMINANTE F2 -D65	1,85	1,38	2,81	1,33
7	<b>MATCH 2</b>	2,30	2,13	1,30	1,19
8	ILUMINANTE F11-D65	2,26	2,83	1,78	1,52
9	ILUMINANTE A -D65	2,71	3,58	3,39	2,28

**Tabla 5.3. Selección de Iluminantes CIE según menor diferencia de color para M2**

<b>SELECCIÓN DE ILUMINANTES CIE SEGÚN MENOR DIFERENCIA DE COLOR CIEL*a*b* PARA M3.</b>				
<b>Resultados Diferencia de Color</b>		<b>M3</b>	<b>M3</b>	<b>M3</b>
<b>(CIE, 1931) Iluminantes CIE- D65</b>		<b>d5</b>	<b>c8</b>	<b>42</b>
1	ILUMINANTE F7 -D65	0,25	0,33	0,24
2	ILUMINANTE C -D65	0,16	0,36	0,36
3	ILUMINANTE D75 -D65	0,15	0,54	0,68
4	ILUMINANTE B -D65	0,32	1,01	1,21
5	ILUMINANTE D50 -D65	0,30	1,12	1,31
6	ILUMINANTE F2 -D65	1,45	1,19	1,13
7	<b>MATCH 3</b>	0,33	0,24	2,04
8	ILUMINANTE A -D65	0,95	2,94	3,12
9	ILUMINANTE F11-D65	4,41	2,56	2,44

**Tabla 5.4. Selección de Iluminantes CIE según menor diferencia de color para M3**

<b>SELECCIÓN DE ILUMINANTES CIE SEGÚN MENOR DIFERENCIA DE COLOR CIEL*a*b* PARA M4.</b>					
<b>Resultados Diferencia de Color</b>		<b>M4</b>	<b>M4</b>	<b>M4</b>	<b>M4</b>
<b>(CIE, 1931) Iluminantes CIE- D65</b>		<b>a 50</b>	<b>c 50</b>	<b>e 33</b>	<b>g 40</b>
1	ILUMINANTE F7 -D65	0,17	0,04	0,03	0,16
2	ILUMINANTE C -D65	0,11	0,01	0,04	0,24
3	ILUMINANTE D75 -D65	0,07	0,07	0,14	0,27
4	<b>MATCH 4</b>	0,22	0,06	0,49	0,44
5	ILUMINANTE D50 -D65	0,17	0,15	0,29	0,55
6	ILUMINANTE B -D65	0,25	0,16	0,29	0,46
7	ILUMINANTE F11 -D65	0,45	0,37	0,67	0,86
8	ILUMINANTE F2 -D65	0,99	0,22	0,28	0,88
9	ILUMINANTE A -D65	0,84	0,46	0,80	1,36

**Tabla 5.5. Selección de Iluminantes CIE según menor diferencia de color para M4**

5.3.2 Resultados de la diferencia de color en el campo CIEL\*a\*b\* para los colores de las muestras 1 a 4 iluminadas bajo emisiones espectrales MATCH 1-4 comparados con los mismos colores iluminados bajo D65. Resultados de Cálculo y Experimental.

Luego de realizados los cálculos de diferencia de color para evaluar la presentación de los colores del objeto de exhibición bajo cada iluminante CIE y también bajo el iluminante MATCH diseñado en función del Perfil de Reflectancia Espectral Representativa (P.R.E.R.) del objeto muestro, solamente los perfiles de emisión diseñados MATCH 1,2,3 y 4 se han introducido en un iluminador de lámparas de LEDs de potencia espectral regulable y se han realizado mediciones de la emisión resultante en cada uno de los casos.

Con las emisiones resultantes medidas se ha vuelto a realizar el cálculo de diferencia de color en el campo L\*a\*b\* de los colores presentes en cada una de las muestras iluminadas con la emisión MATCH experimental, comparados con los mismos colores bajo el Iluminante teórico CIE D65.

Los resultados de diferencia de color en el campo L\*a\*b\* tanto de la etapa cálculo como las de experimental normalizado y/o reconstruido se han evaluado de acuerdo al criterio dictado por CIE para las diferencias de color perceptibles y aceptables Asimismo, se han evaluado las diferencias de resultados entre las producidas en la etapa de cálculo y las producidas en la etapa de experimentación (Tablas 6 a 9) [CIE,2006; CIE,2007; CIE,2009; CIE,2011; CIE,2014].

<b>MUESTRA M1</b>	<b>M1</b>	<b>M4</b>	<b>M14</b>
Diferencia Color CIE	Rojo	Amarillo	Azul
Cálculo	3,22	2,70	1,39
Experimental Normalizado	3,64	2,69	1,38
Experimental Reconstruido	3,81	2,75	1,40

**Tabla 5.6. Diferencia de color CIEL\*a\*b\* para los colores M1 bajo MATCH 1**

<b>MUESTRA M2</b>	<b>M2 19</b>	<b>M2-47 -pa</b>	<b>M2b -20</b>	<b>M2c-12</b>
Diferencia Color CIE	rojo	amarillo	verde	azul
Cálculo	2,30	2,13	1,30	1,19
Experimental Normalizado	3,07	2,56	1,89	1,39
Experimental Reconstruido	3,13	2,58	1,78	1,40

**Tabla 5.7. Diferencia de color CIEL\*a\*b\* para los colores M2 bajo MATCH 2.**

<b>MUESTRA M3</b>				
Diferencia Color CIE	<b>M3 c8</b>	<b>M3 45</b>	<b>M3 b6</b>	<b>M3 d5</b>
Cálculo	2,19	2,98	0,24	0,33
Experimental Normalizado	2,19	2,98	0,25	0,33
Experimental Reconstruido	2,27	3,03	0,25	0,34

**Tabla 5.8. Diferencia de color CIEL\*a\*b\* para los colores M3 bajo MATCH 3.**

<b>MUESTRA M4</b>				
Diferencia Color CIE	<b>M4 a50</b>	<b>M4 e33</b>	<b>M4 g40</b>	<b>M4 c50</b>
Cálculo	0,22	0,11	0,44	0,06
Experimental Normalizado	0,22	0,11	0,44	0,06
Experimental Reconstruido	0,26	0,11	0,47	0,06

**Tabla 5.9. Diferencia de color CIEL\*a\*b\* para los colores M4 bajo MATCH 4.**

En este quinto capítulo se ha explicado la metodología de selección de iluminantes CIE y de diseño de la emisión espectral de fuentes de luz para uso en museos en atención a la misión de presentación -complementaria de la preservación. Es la respuesta del presente trabajo al modo en que se debe ajustar la calidad de la emisión espectral que se proyecta sobre las obras de arte y los objetos exhibidos en museos, primeramente para su preservación, pero también de cómo dicho ajuste se traduce en una calidad de presentación que sea aceptable en términos de percepción de color.

Consideramos por lo anterior, que evaluar la presentación en clave del desplazamiento dentro del espacio de color CIE L\*a\*b\* de las variables psicofísicas de color, nos acerca una primera y valiosa noción de uno de los aspectos claves de la presentación que tiene una clara relación con la emisión espectral de una fuente [CIE,2006; CIE,2007; CIE,2009; CIE,2011; CIE,2014].

Como se elabora posteriormente en el capítulo de futuros estudios, es evidente la necesidad de indagar más profundamente en la percepción de color a partir de experimentar con observadores. Más allá de su pertinencia, en nuestro caso dicha complejidad excedía el enfoque, recursos y plazos de esta tesis doctoral.

En el marco de un estudio de las emisiones espectrales usadas en la iluminación de museos como el presente, se ha dado un primer paso explorando y evaluando el estado inicial de las variables físicas del estímulo visual producido por las emisiones en interacción con las reflectancias del material iluminado. Evaluada esa primera instancia, hallamos que presenta condiciones favorables para una buena visión de color, lo cual es auspicioso de una buena presentación y nos estimula a complementar su caracterización con estudios futuros.

## **CAPÍTULO 6. ETAPA EXPERIMENTAL**

La finalidad de poder analizar, clasificar y diseñar la emisión espectral de fuentes de luz ha guiado este trabajo de investigación desde su génesis. La lógica conceptual y la validez de la metodología de selección y de diseño de emisiones espectrales generó la necesidad de concebir un iluminador con destino de uso en museos que tuviera la versatilidad en el manejo de un perfil de emisión espectral determinado según la obra a iluminar. En este capítulo se describe la faz experimental de esta investigación que llevó a la concreción del iluminador mencionado y los resultados que del mismo se obtuvieron.

Se ha propuesto un experimento de comparación del deterioro mensurable en tres reproducciones de la M2 expuestas bajo la emisión de tres distintos tipos de fuentes: a) Un iluminador de lámparas LEDs de emisión regulable; b) Una lámpara incandescente y; c) Una Lámpara fluorescente.

### **6.1 Las fuentes de la etapa experimental.**

#### **6.1.1 Iluminador de lámparas a LEDs de emisión controlable.**



**Figura 6.1. Iluminador de lámparas a LED.**

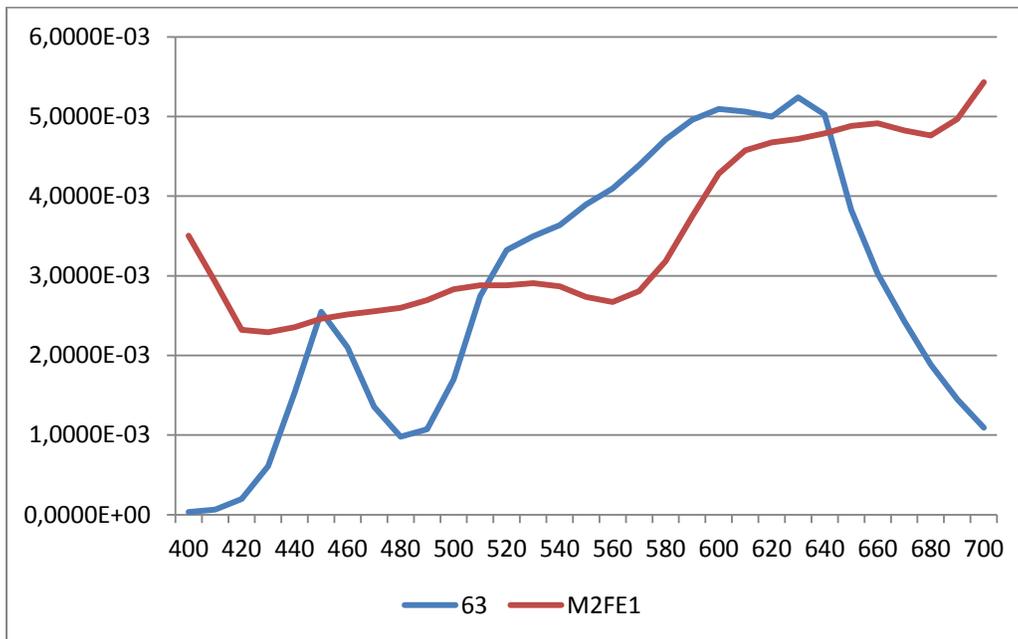
El iluminador de lámparas LEDs construido para ser empleado en la etapa experimental consiste en un arreglo de cinco lámparas LEDs, tres de ellas con una emisión equivalente a un RGB y dos de ellas con una emisión de luz blanca, una en blanco cálido y el restante en blanco frío, colocados en un soporte deslizable en horizontal. .

Más específicamente, el iluminador de LEDs está provisto de tres lámparas R.G.B. que emiten potencia en los rangos espectrales de 440 , 520 y 640 nm. aproximadamente. A ellas se suman una lámpara de LED blanco frío y de blanco cálido para suavizar y homogeneizar la mezcla. Están montadas en una luminaria provista de un lente de difusión y se alinean en un soporte que permite superponer sus emisiones y que se desliza a lo largo de un eje.

Las lámparas están conectadas mediante cableado a una consola con capacidad de regulación de la emisión de cada lámpara por separado y con capacidad de grabar seis escenas, o emisiones modeladas diferentes.

A pesar de lo anterior, tanto por el número de lámparas, pero sobre todo por el rango espectral de sus emisiones, y también en cierta medida debido al grado de sutileza de la regulación de la consola, se ha encontrado un límite experimental en la posibilidad de reproducir el perfil de emisión MATCH2 con exactitud, para iluminar la reproducción correspondiente.

Esto último ha significado una limitación tecnológica en la capacidad de modelar un perfil de emisión de mayor coincidencia con el P.R.E.R de M2. La solución de compromiso ha sido lograr la coincidencia entre los perfiles de reflectancia y de emisión de la mayor cantidad de puntos como ha sido posible



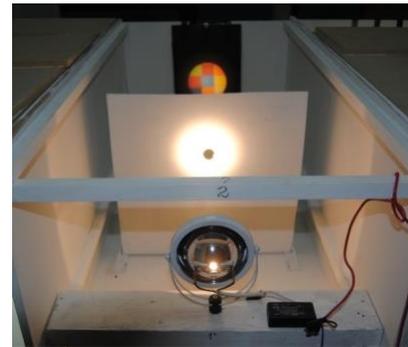
**Figura 6.2. Muestra M2 iluminada mediante el iluminador de lámparas a LEDs. Perfil de reflectancia espectral de la muestra y el perfil de emisión del Iluminador.**

El gráfico de la figura 6.2 ilustra la relación de coincidencia apenas parcial entre el Perfil de Reflectancia Espectral Representativo (P.R.E.R) de M2, la muestra elegida para las mediciones de la etapa experimental, con el Perfil de Emisión Espectral de la fuente (P.E.E.), en este caso del Iluminador de LEDs que fue diseñado mediante la regulación de emisión de sus 5 lámparas de LEDs, y que mayor cantidad de puntos de coincidencia logró con el P.R.E.R. de referencia M2 (Fig 6.2). Del mismo modo, tampoco ha sido posible que en todos los puntos del rango del espectro, el valor de emisión del perfil de la fuente (P.E.E.) sea inferior al valor de reflectancia espectral dado por el perfil de reflectancia (P.R.E.R) de M2, lo que supuso de antemano una cierto valor de factor deteriorante que se ha calculado y evaluado luego de la exposición, de acuerdo al cambio de color producido en el área expuesta, medido en términos de desplazamiento en el campo  $L^*a^*b^*$ .

#### 6.1.2 Lámpara de filamento incandescente halogenada.

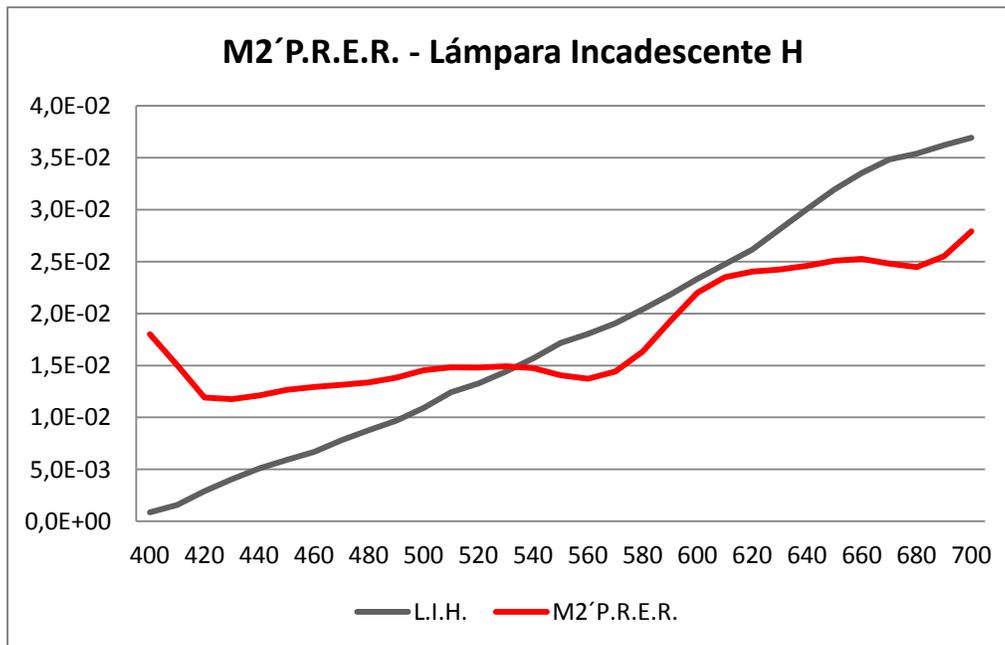


Lámpara: incandescente Halógena.  
Sección: 111 mm G53.  
Potencia: 35W.  
Ángulo de apertura: 24°  
T° C°: 2600 °K.  
Flujo luminoso:  
Fabricante: Osram.



**Figura 6.3. Muestra M2 y lámpara incandescente de la etapa experimental.**

La segunda lámpara empleada en la etapa experimental es la incandescente mejorada mediante halogenuros, de 111 mm. de diámetro montada sobre un soporte deslizante (Fig 6.3).



**Fig. 6.4. Muestra M2 iluminada mediante lámparas incandescentes halogenadas. Perfil de reflectancia espectral de la muestra y perfil de emisión de la fuente.**

Es la lámpara de uso más extendido en la iluminación de museos, por razones que tienen que ver con su alto desempeño en el rendimiento de color, con C.R.I. de 99 y con su agradable temperatura de color. El perfil de su emisión espectral (P.E.E.) y la comparación con el perfil de reflectancia espectral representativa (P.R.E.R.) de la muestra M2 a exponer se presentan en la figura 6.4.

### 6.1.3 Lámpara fluorescente compacta.

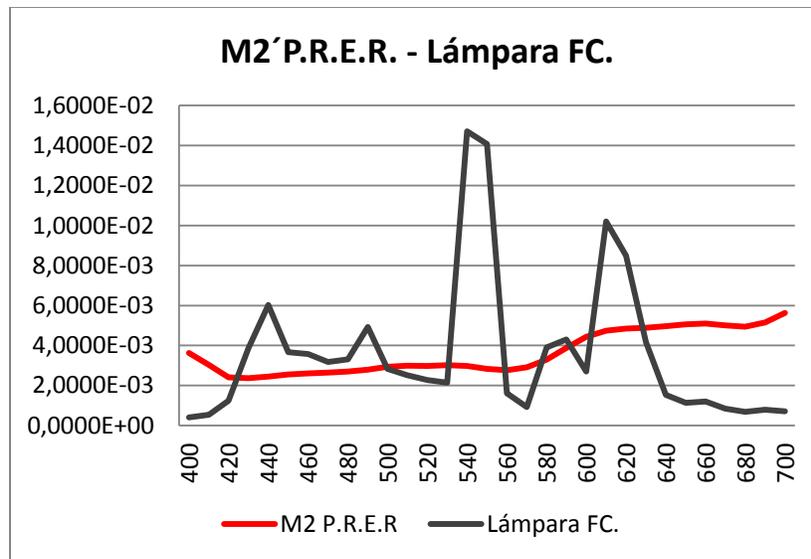


Lámpara: fluorescente compacta.  
Potencia: 20 W. (dos unidades).  
T° C°: 6.700 °K.  
Flujo Luminoso: 1152 Lum.  
Fabricante: Alic.



**Figura 6.5. Muestra M2 y lámpara fluorescente compacta de la etapa experimental.**

La tercera lámpara usada en la etapa experimental es la fluorescente compacta. Su empleo en la iluminación de museo es casi descartado, salvo para iluminación de base y con el máximo C.R.I. posible y una temperatura de color asimilable o equivalente a las alcanzadas por las lámparas incandescente.



**Figura 6.6. Muestra M2 iluminada mediante lámparas fluorescentes compactas. Perfil de reflectancia espectral de la muestra y perfil de emisión de la fuente.**

Su perfil de emisión espectral (P.E.E.) comparado con el (P.R.E.R.) de la muestra se presenta en la figura 6.6.

## 6.2. Las condiciones de exposición.

Las condiciones de exposición de las reproducciones de la muestra, para los tres casos han sido los siguientes:

- Se han realizado en una cabina de mediciones construida para tal fin.
- Se han realizado las mediciones y los correspondientes Perfiles de Reflectancia Espectral Representativa (P.R.E.R) para cada reproducción al inicio y al final del período de exposición. Asimismo, se han tomado mediciones colorimétricas de coordenadas cromáticas y de campo CIEL\*a\*b\* de las áreas expuestas, previa y posteriormente a su exposición.
- La exposición de las tres muestras se ha realizado con referencia de la Exposición Total Anualizada, que en las normativas de conservación de Europa y Norteamérica. regulan los límites de exhibición de las obras en museos y que se estima de una exposición máxima permitida de 100 Lux por 10 horas diarias y un período de 180 días al año, lo que resulta en la magnitud de 180 kLux.h.y.

## 6.3. Caracterización de las muestras de la etapa experimental.

### 6.3.1. Tamaño de las muestras: A4 (21 cm. X 29 cm)

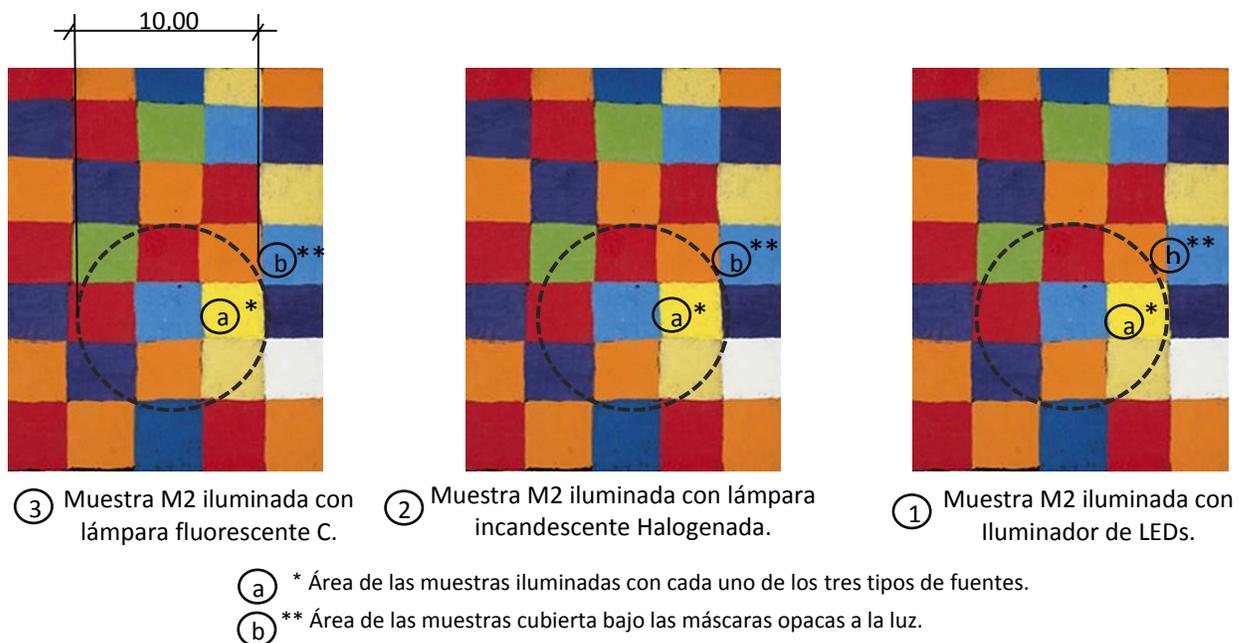
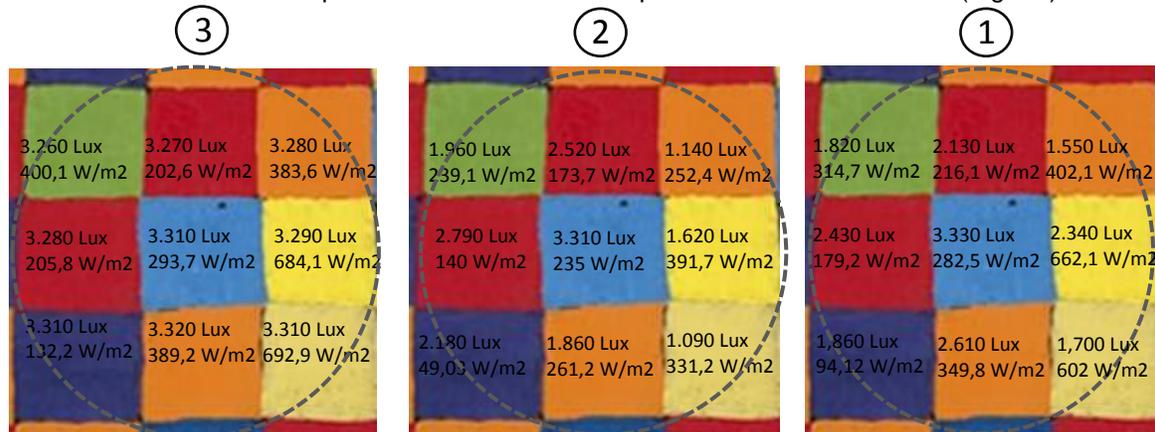


Figura 6.7. Reproducciones de la Muestra M2. Áreas de exposición.

La caracterización de las zonas de las reproducciones de M2, que fueron expuestas a la iluminación de los tres tipos de fuentes (Fig.6.8), pone de manifiesto que en la iluminación de las tres muestras se ha realizado con el criterio de igualar la iluminancia máxima en el cuadrado del centro - en color azul cielo - de las tres zonas expuestas.

El valor de la iluminancia es para los tres casos es de aproximadamente 3.310 lux (Fig.6.8).



**Fig.6.8. Caracterización de áreas de exposición. Iluminancias y Luminancias**

La homogeneidad de las iluminancias de las distintas fuentes es muy diferente, según revela en la caracterización de las muestras expuestas. Al hacer un promedio de las iluminancias medidas en los nueve espacios de color de las zonas expuestas a las tres diferentes fuentes, se nota una apreciable diferencia en el promedio de cada una de ellas (Tabla 6.1). Entre el promedio más alto de iluminancia obtenido, en tal caso el de la muestra M2 bajo la iluminación de lámparas fluorescentes compactas (3.290 lux) y el promedio más bajo de iluminancia obtenido para la muestra M2 expuesta bajo la iluminación de una lámpara Incandescente halógena (2.052 lux) hay una diferencia de 37,75%.

M2 - Fluorescente Compacta		ILUMINANCIA (Lux)	M2 - Incandescente H°		ILUMINANCIA (Lux)	M2 - Iluminador LEDs		ILUMINANCIA (Lux)
SUPERIOR	IZQ	3.260	SUPERIOR	IZQ	1.960	SUPERIOR	IZQ	1.820
	CTR	3.270		CTR	2.520		CTR	2.130
	DER	3.280		DER	1.140		DER	1.550
CENTRO	IZQ	3.280	CENTRO	IZQ	2.790	CENTRO	IZQ	2.430
	CTR	3.310		CTR	3.310		CTR	3.330
	DER	3.290		DER	1.620		DER	2.340
INFERIOR	IZQ	3.310	INFERIOR	IZQ	2.180	INFERIOR	IZQ	1.860
	CTR	3.320		CTR	1.860		CTR	2.610
	DER	3.310		DER	1.090		DER	1.700
ILUMINANCIA PROMEDIO		<b>3.292</b>	ILUMINANCIA PROMEDIO		<b>2.052</b>	ILUMINANCIA PROMEDIO		<b>2.197</b>
EXPOSICIÓN DIARIA (1) *		<b>79.013</b>	EXPOSICIÓN DIARIA (1) *		<b>49.253</b>	EXPOSICIÓN DIARIA (1) *		<b>52.720</b>
EXPOSICIÓN TOTAL ANUALIZADA (20) *		<b>1.580.267</b>	EXPOSICIÓN TOTAL ANUALIZADA (32) *		<b>1.576.107</b>	EXPOSICIÓN TOTAL ANUALIZADA (30) *		<b>1.581.600</b>

\* Exposición Total Acumulada medida en k.Lux.h.y. resultante de la Iluminancia promedio en cada una de las 3 muestras M2 iluminadas durante 24 hs. y según la cantidad de días (paréntesis) necesarios para la equivalencia en los tres casos.

**Tabla 6.1. Caracterización y cálculo de la exposición de las áreas. Etapa experimental.**

Debido a las diferencias de homogeneidad entre las tres fuentes y a las consecuentes diferencias en el promedio de iluminancias utilizadas para el cálculo de Exposición Total Anualizada de cada una de las muestras, ya que en todos los casos la exposición se realiza durante 24 horas ininterrumpidas, la variable de ajuste para lograr la equivalencia en la Exposición Total Anualizada (E.T.A.) de las tres reproducciones, ha sido la cantidad de días durante los que se ha expuesto cada una de las muestras.

Para el caso de la muestra bajo iluminación de lámparas fluorescentes compactas, la duración la exposición es de 20 días; para la muestra iluminada con el iluminador es de 30 días y para la muestra iluminada con lámpara incandescente halógena es de 32 días, con el fin de llegar en cada caso a un valor aproximado de E.T.A. de aproximadamente 1.580.000 lux.h.y. [CIE,2004].

El parámetro de exposición que se utiliza como referencia para la etapa experimental del presente trabajo, es el de la Exposición Total Anualizada que regula la actividad museológica en cuanto al máximo anual permitido de exposición de obras de arte. Es un parámetro que resulta de multiplicar 100 lux por 10 horas diarias por 180 días, resultando en un total de 180.000 lux.h.y.[CIE,2004].

La etapa experimental del presente trabajo, supone la exposición de las tres reproducciones de M2 ante distintas fuentes de iluminación de modo que la exposición resultante sea el equivalente a una cierta cantidad de años de Exposición Total Anualizada (E.T.A.). En el caso de nuestra etapa experimental representa equivalente de nueve años de exposición total anualizada

Adicionalmente se ha realizado la comparación de los perfiles de emisión espectral de todas las fuentes, tanto el iluminador de lámparas LEDs, la fluorescente compacta, como la incandescente halogenada (Fig 6.2; Fig. 6.4 y Fig. 6.6) con el perfil de reflectancia espectral representativo (P.R.E.R) de la muestra M2. El valor de Factor Deteriorante (F.D.) de los tres tipos de fuentes se ha calculado y se consigna en la tabla 6.2.

<b>CÁLCULO DE LOS FACTORES DETERIORANTES DE LAS MUESTRAS PREVIAS A EXPOSICIÓN</b>		
<b>M2. Lámpara Fluorescente C.</b>	<b>M2- Lámpara Incandescente H°</b>	<b>M2- Iluminador de LEDs.</b>
0,29	0,22	0,13

**Tabla 6.2. Factores deteriorantes (F.D.). Etapa experimental.**

#### **6.4. Resultados de la etapa experimental.**

El análisis de los resultados se ha realizado tomando por separado, las zonas del centro de la superficie iluminada y las de la periferia de la misma, analizando primero el color central y luego los periféricos. Esto último debido a las diferencia en la homogeneidad de iluminancias medida en la caracterización. Debido a ella las únicas zonas igualadas en radiación fueron las centrales de color azul cielo.

En primer término, se consignan en la Tabla 6.3. los resultados del color azul cielo, el color del cuadrado central de cada una de las tres zonas de exposición. Allí se había dado la igualación de las Iluminancias proyectadas por las diferentes lámparas, en una cantidad aproximada de 3.310 lux. Se trata del único caso en que las tres superficies de un mismo color alcanzan el valor de exposición total al mismo tiempo, debido a estar todas ellas bajo la misma cantidad de radiancia e iluminancia.

$$\text{DELTA E} : \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

LAMPARA FLUORESCENTE COMPACTA			LÁMPARA INCANDESCENTE HALOGENADA			ILUMINADOR DE LÁMPARAS LEDs			
	EF3 exp - cel	FE 3-cel	DELTA E	EF2 exp -cel	FE 2-cel	DELTA E	EF1 exp - cel	FE 1-cel	DELTA E
Observer: 2 degrees									
L*	60,51	58,07	6,46	60,59	59,21	5,37	60,43	58,38	5,35
a*	-5,26	0,32		-4,53	0,06		-4,21	0,42	
b*	-30,50	-32,65		-30,49	-32,91		-30,95	-32,66	
Observer: 10 degrees									
L*	61,96	59,54	6,14	62,01	60,68	5,06	61,88	59,83	5,21
a*	-10,44	-5,27		-9,67	-5,46		-9,49	-5,08	
b*	-27,85	-30,13		-27,90	-30,40		-28,33	-30,19	

**Tabla 6.3. Resultados de cambio de color post-exposición. Etapa experimental. Color testigo azul cielo.**

El valor de exposición total anualizada (E.T.A.) en las tres áreas centrales de color azul cielo se alcanzó luego de 20 días de exposición. Posterior al período de exposición se realizó la medición de los valores de colorimetría en cada uno de los cuadrados centrales de las tres muestras expuestas, es decir mediciones de  $L^*a^*b^*$  y de coordenadas cromáticas (x,y,z) [CIE, 2006; CIE,2007; CIE,2009; CIE,2011; CIE,2014].

Con los valores obtenidos en las mediciones, tanto del campo  $L^*a^*b^*$  como de las coordenadas cromáticas, se calculó el desplazamiento en el campo CIEL<sup>\*</sup> $a^*b^*$  para observadores de 2 y 10 grados, del color azul cielo situado en el centro del área expuesta medido posterior a la exposición, respecto del mismo color medido previo a la exposición. [CIE,2006; CIE,2007; CIE,2009; CIE,2011; CIE,2014].

Se ha procedido de esta manera debido que el primer síntoma de deterioro o daño foto-químico es un *fading* o decoloración [Thomson,2008], que en algún caso resulta incluso perceptible a simple vista en el caso de nuestras muestras expuestas (Fig.6.9).



**Figura 6.9. Cambio de color post-exposición de la muestra expuesta a la lámpara fluorescente compacta.**

Evaluar el desempeño de las lámparas empleadas en la etapa experimental equivale a medir, dada una igual exposición total anualizada (E.T.A.), el cambio de color producido en la superficie

expuesta en términos de la distancia del desplazamiento en el campo  $L^*a^*b^*$  del color, medido antes de exposición versus el color medido post iluminación.

De acuerdo a los resultados del menor desplazamiento de color producido entre las tres superficies expuestas bajo los tres tipos de fuentes, encontramos un virtual empate en el mejor desempeño entre el Iluminador de LEDs y la lámpara incandescente halogenada. Ambas obtienen casi idénticos resultados de desplazamiento de color en el campo  $L^*a^*b^*$ , obtenidos tanto en observadores de 2 y 10 grados (Tabla 6.3).

Esto las convierte en las dos mejores fuentes (de las que se analizan en la etapa experimental de este estudio) en términos del aspecto de *Preservación* del museo y ambos obtienen un menor y consecuentemente mejor resultado de desplazamiento de color en el campo  $L^*a^*b^*$ , que los obtenidos por la lámpara fluorescente compacta.

LÁMPARA FLUORESCENTE COMPACTA			LÁMPARA INCANDESCENTE HALOGENADA			ILUMINADOR DE LÁMPARAS LEDs		
Observer: 2 degrees								
DELTA E			DELTA E			DELTA E		
Color post exp.	Color sin exp.		Color post exposición.	Color sin exposición.		Color post exposición.	Color sin exposición	
Celeste	Celeste	6,46	EF2exp -cel	FE 2-cel	5,37	EF exp 1 -cel	FE 1-cel	5,35
Azul	Azul	7,41	ExF2- Azul	FE2-Azul	6,39	ExF1- Azul	FE1-Azul	6,40
Verde	Verde	5,50	ExF2-Verde	FE2-Verde	4,74	ExF1-Verde	FE1-Verde	4,79
Ocre	Ocre	5,92	ExF2-Ocre	FE2-Ocre	3,48	ExF1-Ocre	FE1-Ocre	4,42
Rojo 1	Rojo1	5,73	ExF2-Rojo 1	FE2-Rojo 1	4,33	ExF1-Rojo 1	FE1-Rojo 1	5,25
Amarillo	Amarillo	4,30	ExFAAmarillo	FE2-	3,29	ExF1-Amarillo	FE1-	3,82
Naranja1	Naranja1	6,62	ExF2 –	FE2-	4,80	ExF1-	FE-Naranja	5,45
Observer: 10 degrees								
Color post exp.	Color sin exp.		Color post exp.	Color sin exp.		Color post exp.	Color sin exp.	
EF3 excel	FE 3-cel	6,14	EF2exp -cel	FE 2-cel	5,06	EF exp 1 -cel	FE 1-cel	5,01
ExF3- Azul	FE3-Azul	7,16	ExF2- Azul	FE2-Azul	6,18	ExF1- Azul	FE1-Azul	6,15
ExF3-Verde	FE3-Verde	4,98	ExF2-Verde	FE2-Verde	4,23	ExF1-Verde	FE1-Verde	4,20
ExF3-Ocre	FE3-Ocre	5,28	ExF2-Ocre	FE2-Ocre	3,11	ExF1-Ocre	FE1-Ocre	3,88
ExF3-Rojo 1	FE3-Rojo1	5,44	ExF2-Rojo 1	FE2-Rojo 1	4,12	ExF1-Rojo 1	FE1-Rojo 1	5,14
ExF3-Am.	FE3-Am.	3,68	ExF2-Am.	FE2-Am.	2,70	ExF1-Am.	FE1- Am.	3,22
ExF3-Nar1	FE3-Nar1	5,92	ExF2-Nar1	FE2-Nar1	4,27	ExF1-Nar1	FE-Nar1	4,95

**Tabla 6.4. Resultados de cambio de color post-exposición. Etapa experimental.**

El análisis de los resultados del resto de los colores , que se encuentran en los cuadrados periféricos del área expuesta en las tres reproducciones de la muestra M2, usada en la etapa experimental, es confirmatorio de los resultados del color testigo azul cielo situado en el centro del área expuesta en términos generales, aunque corresponden algunas aclaraciones (Tabla 6.4)

En principio las cifras de distancia o desplazamiento en el campo  $L^*a^*b^*$  del Iluminador de LEDs y de la lámpara incandescente halógena son muy similares entre sí y ambas menores que las cifras de desplazamiento en el campo de color obtenidos por la lámpara fluorescente compacta (Tabla 6.4).

Entre las cifras obtenidas por el iluminador de LEDs se observa un muy pequeño margen favorable, o sea de menor distancia o desplazamiento en el campo de color respecto del obtenido por la lámpara incandescente halógena en los colores azul oscuro para observador de 2° y en el color verde para observador de 10°.

Asimismo un virtual empate entre ambas fuentes, con pequeñas diferencias de centésimo en los colores azul, verde y amarillo para observadores de 2 grados e igualmente en el caso del color naranja para observador de 10 grados (Tabla 6.4).

En los colores rojo para observadores de 2 y 10 grados, ídem para color ocre ,naranja para observador de 2° y amarillo para observador 10 grados los resultados favorecen a la lámpara incandescente halógena (Tabla 6.4).

Sin embargo, si analizamos la exposición total de las fracciones de área observamos que al ajustar el tiempo en función de las diferencias de Iluminancias entre las tres lámparas a partir de un promedio de Iluminancia de las nueve fracciones de área expuesta, se da el caso de diferentes exposiciones de la fracción de color en las tres muestras.

Si tomamos un ejemplo significativo de esto, por caso el amarillo, debido a la gran diferencia entre las Iluminancias de cada fuente en ese punto, resulta que sus exposiciones totales anualizadas (E.T.A.) son bien diferentes y las vemos en comparación con los resultados de desplazamiento en el campo de color  $L^*a^*b^*$  (observador 10°):

1. Iluminador de LEDs 1.904.440 lux.h.y.- 3,22.
2. Incandescente Halógena 1.438.560 lux.h.y – 2,70.
3. Fluorescente Compacta 1.816.080 lux.h.y - 3,68. (Tabla 6.4).

El análisis de estos resultados en función de la exposición total anualizada efectivamente realizada en la zona del amarillo, confirma un peor desempeño de la lámpara de Fluorescente compacta, incluso luego de una menor E.T.A que la del iluminador de LEDs.

Al comparar entre la I.H. y el Iluminador más allá de los resultados absolutos, vemos que el Iluminador de LEDs ha tenido una E.T.A. mayor en un 24,5 % a la E.T.A. de la Incandescente mejorada. A pesar de ello, el resultado obtenido por la Incandescente halógena mejora sólo un 19.25% al resultado obtenido por el Iluminador, lo que plantea nuevamente una virtual situación de empate- incluso con un mínima ventaja del Iluminador- entre ambos si se hace una relación lineal entre sus desempeños (Tabla 6.4).

Adicionalmente, es importante notar que los resultados de deterioro del Iluminador se obtienen con un consumo energético significativamente menor que la lámpara incandescente. La comparación de eficiencia energética entre lámparas a LED y lámparas incandescentes es claramente favorable a las primeras que consumen una fracción menor al 30% de la energía de las tradicionales en su versión mejorada [IES,2011].

Basados en el análisis de los resultados de cambio de color medidos en las muestras empleadas en la Etapa Experimental, consideramos que se confirma un igual desempeño de la lámpara incandescente mejorada y del Iluminador de LEDs regulado con el Perfil de Emisión n°63, en ambas un resultado mejor que los obtenidos por la lámpara fluorescente compacta.

Un poco menos consistente resulta la evaluación de la capacidad de predicción del factor deteriorante. Observamos comparados los resultados de los Factores deteriorantes obtenidos previamente a la exposición de las tres muestras bajo las distintas lámparas y a los resultados de cambio de color obtenidos en las muestras expuestas bajo las diferentes fuentes:

1. Iluminador LEDs- Perfil 63 = 0,13 ; Distancia  $L^*a^*b^*$  ( $2^\circ$ ) = 5,35.
2. Lámpara Incandescente Halógena F.D.= 0,22; Distancia  $L^*a^*b^*$  ( $2^\circ$ ) = 5,37.
3. Lámpara Fluorescente Compacta F.D.= 0,29 ; Distancia  $L^*a^*b^*$  ( $2^\circ$ ) = 6,46. (Tabla 6.4)

Podemos decir de acuerdo a los resultados obtenidos en cuanto a la capacidad predictiva del método de los Factores deteriorantes que acierta a detectar la tendencia general de lo que ocurre con el deterioro medido en términos de cambio de color de área expuesta, medido en función del desplazamiento en el campo de color CIE  $L^*a^*b^*$ .

Sin perjuicio de lo anterior, hay mejoras que hacer en relación a su precisión, visto lo ocurrido en la predicción del factor deteriorante (F.D.) del iluminador y el desplazamiento en el campo de color  $L^*a^*b^*$  efectivamente medido en el área expuesta a su emisión. (Tabla 6.2)

Consideramos que las razones de esa menor consistencia en la precisión del método deben buscarse en los coeficientes  $\alpha_j$  (ver el capítulo del cálculo del factor deteriorante) con los que se pondera la potencia excedente a la reflectancia según la longitud de onda, razón del deterioro y medida por el factor deteriorante.

En el capítulo de futuros estudios se mencionan algunas de las líneas de continuidad posibles para el refinamiento del método de los Factores deteriorantes (F.D.), que apuntan a mejorar su precisión y solucionar otros problemas que puedan aparecer en su desempeño.

En cuanto el cumplimiento del objetivo general y de los específicos de este estudio, consideramos que el método de los Factores deteriorantes (F.D.), incluida su fórmula de cálculo es un valioso aporte como instrumento para administrar la emisión espectral que se proyecta sobre unas muestras representativas de las obras de arte y de los objetos de exhibición y de conservación en los museos.

## 7. CONCLUSIONES

A lo largo de los capítulos anteriores hemos expuesto y analizado los procedimientos que se han utilizado, así como los resultados que se han obtenido en esta tesis doctoral. En este capítulo presentamos las conclusiones más significativas del trabajo realizado, ordenadas en función de la verificación de la hipótesis y del alcance de los objetivos propuestos:

7.1. En relación a la hipótesis sobre la que se sostiene el presente trabajo, que se expresa de la siguientes manera:

*Es posible obtener el perfil de Reflectancia de una obra de arte pictórico, que sea suficientemente representativo de la misma, para luego...iluminar una obra de arte con una fuente cuyo perfil de emisión espectral sea coincidente en su forma, con el perfil de reflectancia espectral representativo (P.R.E.R.) de la obra de arte, lo cual permite reducir al mínimo el deterioro por iluminación del objeto iluminado, ya que el deterioro por iluminación tiene como factor principal a la radiación visible y no visible incidente absorbida, siempre que... el estímulo visual resultante de la interacción entre el perfil de emisión espectral (P.E.E.) de la fuente y el perfil de reflectancia espectral representativo (P.R.E.R.), permita una reproducción de color adecuada para el buen cumplimiento de la función de Presentación.*

- En una muestra de reproducciones de obras de arte, seleccionadas bajo el criterio que las considera como una distribución aleatoria de color sobre una superficie, ordenada en una graduación desde un máximo a un mínimo en la discriminación y en la homogeneidad de sus áreas de color, se ha obtenido para cada ejemplar de la misma, su correspondiente Perfil de Reflectancia Espectral Representativo (P.R.E.R.)
- Para obtener el P.R.E.R. de cada muestra, se ha medido en tamaño constante, los diferentes colores y todos los cambios presentes en la obra en cantidad suficiente para establecer una descripción adecuada de la misma. Una vez obtenidos los perfiles de reflectancia espectral de cada medición y luego de desechada la radiación no visible se obtiene el Perfil de Reflectancia Espectral (P.R.E.) de cada ejemplar de la muestra, previo a la ponderación de su representatividad, la que se ha obtenido mediante dos procedimientos de comprobación mutua, uno de ellos geométrico y analógico- los coeficientes de ponderación de área (C.P.A.) y el otro a partir del análisis de la imagen digital de cada muestra – los coeficientes de píxeles (C.Px.).
- El P.R.E.R obtenido para cada ejemplar de la muestra constituye a lo largo del proceso, el insumo de información más importante, ya que en base a ella se generan tanto el análisis de los perfiles de Iluminantes CIE, como el diseño del Perfil de Emisión Espectral (P.E.E.) de una

fuente regulable en una simulación de iluminación –exposición y también en la etapa experimental.

- En términos tanto de la Preservación cuanto de la Presentación, y de acuerdo a la verificación en sendas instancias experimentales, los perfiles P.R.E.R adquiridos mediante la metodología desarrollado han mostrado consistencia en cuanto a su validez y representatividad de la obra. La etapa experimental se diseñó y ejecutó en base a predicciones obtenidas de la información de los perfiles de reflectancia de las muestras. Sin perjuicio de lo anterior, al ser una metodología en desarrollo, es susceptible de mejora y refinamiento.
- A nivel teórico-conceptual, la validación de parte de la hipótesis ha conducido al desarrollo de un método de cálculo para la evaluación y predicción del Factor Deteriorante (F.D.). El método del Factor deteriorante (F.D.) ha permitido una clasificación de los Perfiles de Iluminantes CIE y de las emisiones espectrales MATCH para cada uno de los ejemplares de la muestra, en función del menor deterioro esperable en una obra de arte u objeto iluminado bajo dichas emisiones. Es un aporte novedoso y genuino para una administración razonada e informada del deterioro por exhibición
- En la etapa experimental, se ha realizado una exposición comparada de uno de los ejemplares de la muestra bajo la emisión de tres diferentes tipos de fuentes. En una de ellas, el Iluminador de lámparas a LEDs se ha introducido una de las emisiones espectrales MATCH diseñadas a partir del P.R:E.R. de la misma muestra. La capacidad de modelar la emisión diseñada ha estado limitada a la cantidad de lámparas y a la longitud de onda de sus emisiones, disponibles en el iluminador, por lo que se ha conseguido una aproximación a la emisión diseñada (ver el capítulo etapa experimental).
- Los resultados obtenidos por el iluminador y en el marco de la metodología, luego de la exposición comparada con otras lámparas, indica una validación del principio que se plantea en este tramo de la hipótesis, a pesar de haberse encontrado un límite tecnológico experimental, que es posible de superar con un mejor y más sofisticado equipo.
- La clasificación de los Iluminantes CIE y de las emisiones diseñadas, que surge de la metodología, se constituye en un instrumento para el curador de una muestra en la observancia del aspecto Preservación de la misión del museo, ya que permite la administración informada con precisión, del deterioro que inevitablemente se produce toda exhibición.
- De los numerosos requisitos que deben llenarse para el adecuado cumplimiento del aspecto Presentación de la misión del museo y por supuesto de la iluminación, aquellos que se relacionan a la emisión espectral de la fuente son el rendimiento del color y la temperatura de color. En el presente estudio se ha hecho una primera evaluación del rendimiento de color (color rendering) que puede esperarse de una emisión espectral que se introduce en una fuente regulable compuesta por lámparas a LED. Se ha notado previamente acerca del déficit en la actividad de iluminación, de información acerca del *colour rendering Index* (C.R.I) o una metodología ah-hoc para esta nueva tecnología de fuentes. Dentro del contexto de nuestro estudio hemos decidido que la evaluación de esta parte de la hipótesis debía hacerse empleando el método de diferencia de color en el campo CIEL\*a\*b\*, basados en la información física del estímulo visual y someter sus resultados a las normativas industriales de CIE en el cambio de color.

- Se han realizado los cálculos de diferencia de color en el campo  $L^*a^*b^*$  de los colores de una muestra comparados bajo la iluminación de dos emisiones espectrales, por una parte bajo la emisión espectral del Iluminante o de la emisión diseñada MATCH que se está evaluando y por otra parte bajo la emisión del Iluminante CIE ID65, el de uso más extendido en mediciones colorimétricas.
- Los resultados de diferencia de color en el campo  $L^*a^*b^*$ , tanto en la etapa de cálculo como en la experimental, de los perfiles diseñados (P.E.E.) denominados MATCH 1 al 4, cuando se los emplea en la iluminación de las muestras cuyos Perfiles de Reflectancia Espectral Representativos (P.R.E.R.) se han usado para su diseño, caen mayoritariamente dentro del parámetro más exigente de las normativas CIE de Perceptibilidad y Aceptabilidad en el cambio de color, el parámetro llamado de estricta tolerancia. La única excepción a lo anterior es el color rojo de M1, que cae en el parámetro de Tolerancia normal.
- Los resultados de diferencia de color en el campo  $L^*a^*b^*$ , tanto en la etapa de cálculo como en la experimental, de los perfiles de emisión de los Iluminantes CIE permiten elaborar una clasificación de los mismos, de acuerdo al aspecto de Presentación, que es complementaria de la clasificación de los mismos Iluminantes bajo el aspecto de la Preservación.

En cuanto a los objetivos del trabajo, tanto el general, que es realizar aportes concretos que favorezcan el buen cumplimiento de la misión del museo en sus tres componentes [Miller, 2005] y en cuanto a los objetivos específicos:

- Adicionalmente a la Presentación y a la Preservación, que se abordan en la verificación de la hipótesis, en la misión del museo tiene gran importancia la Eficiencia. En la etapa experimental se ha realizado la exposición comparada de una muestra bajo tres tipos de fuentes. De ellas, a la Incandescente halógena - que es la fuente más extensamente empleada en la iluminación de museos - se la ha comparado con un Iluminador de lámparas de LED ajustado en su emisión a un aproximado del perfil MATCH 2. Los resultados de deterioro medido en términos de cambio de color, de las áreas de ambas reproducciones expuestas bajo sendos tipos de fuentes han resultado en un empate o equivalencia a la vez que en un mejor desempeño que la lámpara restante, o sea la fluorescente compacta. Pues bien, esos iguales o equivalentes desempeños entre la lámpara incandescente y el Iluminador ajustado con una emisión diseñada a partir del perfil de reflectancia de la misma, este último ofrece la ventaja adicional de lograrlo con un consumo de energía eléctrica de un menos de un 30% del consumo requerido por la lámpara incandescente halógena para realizar la misma tarea, basándonos en los consumos y las eficiencias energéticas conocidas y atribuidas para cada tipo de fuente [IES,2011].
- Se ha desarrollado una Metodología de adquisición y caracterización del/os Perfil /es de Reflectancia Espectral Representativos (P.R.E.R) de una muestra, en respuesta y cumplimiento del correspondiente objetivo específico.
- Se ha desarrollado un sistema de Iluminación para su uso en museos, compuesto de una fuente iluminante, de lámparas de LEDs monocromáticas, de distintas bandas de longitud de onda, capaz de combinar emisiones de luz blanca de distinto contenido y perfil espectral (output) en una variedad de opciones determinada y sistematizada en función de la información (input) del Perfil de Reflectancia Espectral Representativa (P.R.E.R) de los objetos a iluminar. Se han encontrado límites en su capacidad de modelado de los perfiles de

emisión debido a la cantidad de lámparas y la longitudes de onda de sus emisiones, además de la sofisticación de su consola de control. Esto debido al contraste que se ha dado entre las inversiones necesarias y las posibles en un desarrollo como el propuesto. La solución de compromiso lograda, a pesar de sus límites, creemos que ha cumplido suficientemente para validar el principio propuesto. Al hacerlo, se constituye como un aporte novedoso en la actividad de iluminar museos.

Como producto y en el conjunto final de todos los aspectos puntualizados en el presente capítulo y explicados a lo largo del desarrollo de este documento, consideramos que se ha desarrollado una Metodología de selección y de diseño de la emisión espectral de fuentes para su uso en la Iluminación de objetos de exhibición y arte, en cumplimiento de las misiones de *Presentación*, *Preservación* y *Eficiencia* del museo.

## **8. TRABAJO FUTURO.**

Respecto del trabajo realizado en esta tesis doctoral algunos temas se pueden sugerir como perspectivas de trabajo futuro.

8.1. En relación a la metodología de adquisición de perfiles espectrales representativos de obras de arte:

- Proponer su empleo para crear un registro de firmas espectrales representativas de obras de arte y de objetos de exposición del patrimonio artístico americano, considerando esto como una ampliación del registro de firmas espectrales de obras de arte realizado en Europa a partir de distintos programas de implementación.

8.2. En relación a la metodología de administración de perfiles espectrales para la preservación y presentación de obras de arte:

- Continuar estudios de la metodología de evaluación y administración del deterioro a partir del refinamiento del factor deteriorante (F.D.) y la formulación de su cálculo. Lo anterior a partir del desarrollo de un software de cálculo que permita un estudio de los factores de ponderación de las potencias excedentes según su posición en el espectro electromagnético, en un significativamente mayor número de casos verificados experimentalmente.
- Continuar estudios de la metodología de evaluación y administración del deterioro a través de explorar las consecuencias del deterioro en el cambio que se registra y se mide en el Perfil de Reflectancia Espectral Representativo (P.R.E.R.) de las áreas expuestas a la radiación. En el presente estudio, el deterioro se mide y se evalúa en función del cambio de color. El estudio propuesto abordaría un aspecto complementario de ese criterio, siempre en función de aportar un conocimiento más profundo del deterioro para mejor cumplimiento del aspecto preservación de la misión del museo.
- Realizar experiencias con observadores que complementen la evaluación de la calidad de la presentación lograda con las emisiones diseñadas, tanto en la percepción de color como de otros aspectos como la temperatura de color y otros aspectos de la percepción humana que aparezcan como relevantes o pertinentes al aspecto de presentación de la misión del museo.

8.3. En relación al Iluminador de museos de lámparas a LED de emisión espectral regulable:

- Una vez que consideramos que el sistema desarrollado es un instrumento válido componente de la metodología de evaluación de Iluminantes y de diseño de emisiones espectrales de fuentes, continuar su desarrollo a partir de incorporar un número de lámparas a LED cuyas emisiones espectrales ofrezcan una variedad de longitudes de onda

espectrales que permitan un mejor y más preciso modelado de la emisión diseñada. En esta misma línea de continuidad, experimentar con otras opciones y cambios en la calidad y sofisticación de la consola de control del artefacto.

- Desarrollo de un software de control del sistema de iluminación, que opere desde la introducción (input) de la información proveniente de la metodología de adquisición de perfiles, que automatice la conversión y el modelado de dicha información en una consecuente emisión espectral de la fuente (output).

## REFERENCIAS.

- Ajmat, R. Mardaljevic, J. and Hanby, V.(2006). Evaluation of shading devices using a hybrid dynamic lighting-thermal mode. En *International Building Performance Simulation Society Annual Meeting IBPSA* .Montreal, Canada: pp. 25- 33.
- Ajmat, R.(2008). *Precision daylight and thermal modelling of shading devices*. Ph. D. Thesis De Montfort University. Institute of Energy and Sustainable Development. Leicester, UK: pp. 22-24.
- Ajmat, R.; Barrionuevo,I.(2010).vEnlightening Narrative Spaces. En *Narrative Spaces Conference. School of Museum Studies* (pp. 108-114). University of Leicester and University of Nottingham, U.K: U.Nottingham Ed.
- Ajmat, R.,Sandoval,J., Arana Sema,F.,O'Donell, B., Gor, S., Alonso,O.(2011) . Lighting design in museums: exhibition vs. preservation. En *proceedings of Light 2011* (pp.45-53) . Poland: Light 2011.
- Araujo, P., Maciel Linhares,J., Cardoso Nascimento, S.(2010). Colour rendering of art paintings under CIE illuminants for normal and deficient observers. En *Journal of the Optical Society of America: 26* (7) 1668-1677.
- Ashley -Smith, J. (1999). *Risk assessment for object conservation*. 1<sup>st</sup> Edition, Butterworth-Heinemann Ed. Oxford, UK: ELSEVIER B-H .358 p.
- Assaf,L.(2005). Eficiencia y ahorro energético en los sistemas de alumbrado. Oportunidades para el mundo en desarrollo. En *Energía en Acción, revista técnica de la Compañía de Luz y fuerza* N°4/05 (pp. 4-12). San José, Costa Rica: CLF.
- Assaf, L; de Wilde, M; De Nóbrega M.(2010). *Evaluación integral de lámparas de mercado basadas en tecnología LED, mediante tecnología de fuentes convencionales y otros específicos*. En X Congreso Panamericano de Iluminación, 2010 ( pp.156-162). Valparaíso, Chile: Luxamérica 2010.
- Assaf, L.(2011). Innovative lighting Systems. En *ELuxa.L.I. Handbook 2011. Efficient Lighting Initiative Institute Ed.*(pp.233-234). Beijin, P.R.China: IIE.
- ASSIST. (2005). *LED life for General Lighting Definition of Life*. En Alliance for Solid-State Illumination System and Technologies- Lighting Research Center-Rensselaer. **7** (1) 1-4.
- Barbieri, Alberto.(1995). *Efficiency and reliability of high-brightness LEDs*. En Cardiff University Editions. Newport, UK. 153 p.
- Beltran,L.O. (2003). Lighting a Museum. En *Proceedings of the Solar World Congress*. Goteborg, Sweden: SWC.

- Beltran, L.O. et al. (2004). Evaluating the daylight performance of tree museum galleries. En *ASES 2004 National Solar Energy Conference*. Portland, OR, US: ASES.
- Berns, R. S., ed Billmeyer and Saltzman. (2000). *Principles of color technology*. New York: John Wiley and Sons, Inc. 3<sup>rd</sup> ed. (pp. 247).
- Boyce, Peter R. (2005). Human factors in lighting. En *New approaches to lighting* (pp. 13-20). London, UK: Taylor and Francis.
- Boyce, Peter R. (2005). Human factors in lighting. En *New approaches to lighting* (pp. 5-8). London, UK: Taylor and Francis.
- Bullough, J.D. (2000). The blue light hazard: A review. En *J.I.E.S.* **15**(9) 6-14.
- Canal Patrimonio. (2010). Fundación Guggenheim presenta estudio de viabilidad para un museo en Helsinki. En <http://www.canalpatrimonio.com/es/noticias/?iddoc=62353>. Consultado 11/01/2011.
- CCI Canadian Conservation Institute (1997). Technical Bulletin nº 26. En [http://www.cci-icc.gc.ca/bookstore/viewCategory\\_e.aspx?id=18](http://www.cci-icc.gc.ca/bookstore/viewCategory_e.aspx?id=18). Consultado 12/01/2011.
- Casal Lopez- Valeiras, J.M. (1993). *Iluminación de Museos*. B. Anabad. ISSN 0210-4164, 1993. 2<sup>o</sup> edición: pp. 11-38.
- CIE, Commission Internationale de L'Éclairage (2002). *Photo biological Safety Standards for lamps*. En Commission Internationale de L'Éclairage. Standards DS. 009 (pp. 204). Viena, Suiza : CIE Ed.
- CIE. Commission Internationale de L'Éclairage (2004a). *Control of damage to museum objects by optical radiation* En Commission Internationale de L'Éclairage. Standards DS (pp: 30). Viena, Suiza : CIE Ed.
- CIE. Commission Internationale de L'Éclairage (2004b) . *The correlation of models for vision and visual performance*. En Commission Internationale de L'Éclairage. Standards DS (pp: 145). Viena, Suiza : CIE Ed.
- CIE Commission Internationale de L'Éclairage (2004c) TC3-22. *Museum lighting and protection against radiation damage*. En Commission Internationale de L'Éclairage (pp. 31-35). Viena, Suiza : CIE Ed.
- CIE Commission Internationale de L'Éclairage (2004d). *Color*. En Commission Internationale de L'Éclairage. Standards DS (pp. 53-55). Viena, Suiza : CIE Ed.
- CIE Commission Internationale de L'Éclairage (2007). En Colorimetry standards [ISO 11664-1:2007\(E\)/CIE S 014-1/E:2006](#): Joint ISO/CIE Standard: Colorimetry — Part 1: CIE Standard Colorimetric Observers. Consultado en 5 de Junio 2013.
- CIE Commission Internationale de L'Éclairage (2006). En Colorimetry standards [ISO 11664-2:2007\(E\)/CIE S 014-2/E:2006](#): Joint ISO/CIE Standard: Colorimetry — Part 2: CIE Standard Illuminants for Colorimetry. Consultado en 5 de Junio 2011.
- CIE Commission Internationale de L'Éclairage (2011). En Colorimetry standards [ISO 11664-3:2012\(E\)/CIE S 014-3/E:2011](#): Joint ISO/CIE Standard: Colorimetry — Part 3: CIE Tristimulus Values. Consultado en 5 de Junio 2014.

- CIE Commision Internationale de L'Eclairage (2011). En Colorimetry standards [ISO 11664-3:2012\(E\)/CIE S 014-3/E:2011](#): Joint ISO/CIE Standard: Colorimetry — Part 3: CIE Tristimulus Values. Consultado en 5 de Junio 2014.
- CIE Commision Internationale de L'Eclairage (2011). En Colorimetry standards [ISO 11664-4:2008\(E\)/CIE S 014-4/E:2007](#): Joint ISO/CIE Standard: Colorimetry — Part 4: CIE 1976 L\*a\*b\* Colour Space. Consultado en 5 de Junio 2014.
- CIE Commision Internationale de L'Eclairage (2011). En Colorimetry standards [ISO 11664-5:2009\(E\)/CIE S 014-5/E:2009](#): Joint ISO/CIE Standard: Colorimetry — Part 5: CIE 1976 L\*u\*v\* Colour Space and u', v' Uniform Chromaticity Scale Diagram. Consultado en 5 de Junio 2014.
- CIE Commision Internationale de L'Eclairage (2011). En Colorimetry standards [ISO/CIE 11664-6:2014\(E\)](#): Colorimetry - Part 6: CIEDE2000 Colour-Difference Formula. Consultado en 5 de Junio 2014.
- CMNUCC .(1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Río de Janeiro. En <http://www.enpositivo.com/expertos-en-la-evolucion-del-clima>. Consultado 12/01/2011.
- CMNUCC.(1997). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Protocolo de Kyoto*. En <http://www.enpositivo.com/expertos-en-la-evolucion-del-clima>. Consultado en 12/01/2011.
- CMNUCC.(2004). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Malasia*. En <http://www.enpositivo.com/expertos-en-la-evolucion-del-clima>. Consultado en 12/01/2011.
- CMNUCC.(2010). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Copenhage*. En <http://www.enpositivo.com/expertos-en-la-evolucion-del-clima>. Consultado en 12/01/2011.
- Coaton, J.R.; Marsden, A.M. (2001) Ultraviolet and infrared radiation. *En Lamps and Lighting* (pp.3-7). 4<sup>th</sup>. Edition. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- Coaton, J.R.; Marsden, A.M. (2001) Relfectance, absortion and transmission. *En Lamps and Lighting* (pp.8-9). 4<sup>th</sup>. Edition. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- Colombo & O'Donnell.(2008). Mejoras en el rendimiento visual con el aumento del contraste. En *IX Congreso Panamericano de Iluminación, Luxamérica 2008* (pp. 67-72). Rosario, Argentina: Luxamérica 2008.
- Colombo & O'Donnell. (2010). Mejoras en el rendimiento visual con la introducción del color. En *X Congreso Panamericano de Iluminación, Luxamérica 2010* (pp.170-178). Valparaíso, Chile: Luxamérica 2010.
- Corgnati, S.P. et al. (2008). Estableciendo un procedimiento para evaluar y controlar la calidad micro-climática de un edificio de museo. En *Elsevier Building and Environment* 4 (09) 1253-1260.

- Cuttle, Christopher (2007). *Lighting for art's sake*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann LTD. pp. 88-91
- Chalmers, Ch., Cuttle, C., Van Ryn.(2007). An experimental Illuminator for Museum Conservation Lighting . En *proceedings of Australian Conference on Optical Fiber Technology* (pp.152-159). Sydney, Au: Australian Optical Society.
- Chalmers, Ch. and Cuttle, C.(2007). Evaluating the performance of an experimental Illuminator for Museum Conservation Lighting . En *Elsevier Buildings and Environment* **45** (3) 103- 106.
- Chang, Chia-Peng C.(2006). The Performance of Daylight with Shading Device in Architecture Design. En *Tamkang Journal of Science and Engineering* **7** (4) 207-212.
- Chen, L.(2009). Perspectives in energy conservation and efficiency.En *American Energy journals* **12** (9) 54-59.
- Chillida–Leku.(2010). Museo Chillida-Leku cierra sus puertas en 1º de enero 2011. En <http://www.museochillidaleku.com/>. Consultado 12/03/2011.
- Chow, CC et al.(2004). Performance of a solar chimney. En *Elsevier Buildings and Environment* **3** (1) 1-17.
- Den Helder, J.(2009). Managing Daylight with Lighting automated controls. En *American Energy Journals* **12** (4) 22-23.
- Del Hoyo Melendez, J.C.(2010). An evaluation of daylight distribution as an initial preventive conservation measure at two Smithsonian Institution Museums. *En Journal of Cultural Heritage*. Washington DC, USA: **12** (1) 54-64.
- Dirk,Carl (2007). Damage by light in exhibition objects. University of Texas En *El Paso Press. Newsletter* 12: pp. 45-50.
- Druzik, James.(2007). *Museum Lighting. Its past and future development*. Padfield and Borchesen Ed. National Museum of Denmark. ISBN 978-87-7602-080-4.
- Druzik, James.(2008). Conservation on modern and contemporary art. En *The Getty Conservation Institute. Newsletter, fall 2008*. Obtenido de [http://www.getty.edu/conservation/publications\\_resources/newsletters/23\\_2/gcinews5.html](http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/newsletters/23_2/gcinews5.html). Consultado 11/01/2012.
- El Mundo. «Comienza en la UE la retirada de bombillas incandescentes de 60 vatios». <http://www.elmundo.es> .Consultado el 9/09/2011.
- Ezrati, J.(2008). Daylighting for Museum, a good choice? . En *Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on NDT of Art*. Jerusalem, Israel: pp 68- 73.
- Feller,R.L.(1964).Control of deteriorating effects of light upon museum objects. En *Museum News*: **17** (2) 57-98.
- Feller,R.L.(1987).Evaluation of Test Procedures for Accelerated Photochemical Aging of Museum and Archival Materials. En *Museum News*. **25** (9) 17-23.

- Forbes (2008). *The LED Illumination Revolution*. Obtenido de <http://www.forbes.com/.2008>. Consultado el 9/06/2011.
- Hardeberg, J.(1999). *Acquisition and Reproduction of Colour images: colorimetric and multispectral approaches*. (PhD. Thesis) pp.324. Paris, France: Ecole Nationale Supérieure des Telecommunications.
- Hardeberg, J.(2001). Multispectral color image acquisition. En *Norwegian Signal Processing Symposium (NORSIG 2001)*. Trondheim, Norway.
- Hoes, J; Hensen, J.L.; Loomans, L.G. De Vries, B.;Bourgeois, D.(2008). User behavior in whole building simulation. En *Energy and buildings*, Elsevier **4**(1) 295-302.
- Huh, C., Schaff WJ., Eastman L.F. And Park S. (2004). Temperature Dependence of Performance of InGaN/GaN MQW LEDs with different Indium compositions. En *Life Fellow, IEEE*. **25** (2) 61-63.
- IES. Applications. Lighting for art . En *Illuminating Engineering Society of north América. The Lighting handbook 2011* (pp 21.4-21.5). 10<sup>th</sup> Edition. New York: IESNA.
- IES. Vision: Eye and Brain. En *Illuminating Engineering Society of north América. The Lighting handbook 2011*. 10<sup>th</sup> Edition (pp 2.14). New York: IESNA.
- IES. Color. En *Illuminating Engineering Society of north América. The Lighting handbook 2011*. 10<sup>th</sup> Edition (pp 6.26). New York: IESNA.
- IES. Luminaires: Forms and optics. En *Illuminating Engineering Society of north América. The Lighting handbook 2011*. 10<sup>th</sup> Edition (pp 8.14 a 8.21). New York: IESNA.
- IES. Light sources: Technical characteristics (pp 7.58 a 7.67). En *Illuminating Engineering Society of north América. The Lighting handbook 2011*. 10<sup>th</sup> Edition (pp 7.58 a 7.67). New York: IESNA.
- Imrie, D.C.(2000). *Temperature Dependence of Hyperbright Blue LEDs*. Brunel University and Rutherford Appleton Laboratory.UK. En [http://www.google.es/#q=Imrie,+D.C.\(2000\).Temperature+Dependence+of+Hyperbright+Blue+LEDs&hl=es&prmd=imvns&filter=0&bav=on.2.or.r\\_gc.r\\_pw.,cf.osb&fp=556ef2dc0f6587d5&biw=1334&bih=655](http://www.google.es/#q=Imrie,+D.C.(2000).Temperature+Dependence+of+Hyperbright+Blue+LEDs&hl=es&prmd=imvns&filter=0&bav=on.2.or.r_gc.r_pw.,cf.osb&fp=556ef2dc0f6587d5&biw=1334&bih=655). Consultado 12/04/2011.
- Gor,S., Sandoval,J.,O'Donell, B., Ajmat, R., Alonso,O.(2010). *Preservación de bienes y elección de fuentes luminosas y materiales*. En *X Congreso Panamericano de Iluminación, 2010* (pp. 221-226). Valparaíso, Chile: Luxamérica 2010.
- Keppens, A., Acuña, PC., Chen,HT., Deconnick,G., Hanselaer,P.(2010). Evaluación de la Eficiencia de LED de alta potencia con fósforo blanco . En *X Congreso Panamericano de Iluminación 2010* (pp. 386-388). Valparaíso, Chile: Luxamérica 2010.

- La vanguardia. (2011). *Naciones unidas pone en marcha un plan para reducir emisiones de carbono hasta 2020*. En <http://www.lavanguardia.com/buscador/index.html?filter.q=naciones+unidas+plan+de+reducci%C3%B3n+carbono+2020&x=44&y=13>. Consultado 9/04/ 2011.
- Llaneza, Diego M.(2006). *Modelo de los cinco anillos de atracción comercial*. Obtenido de <http://www.gestiopolis.com/recursos3/docs/mar/mod5anillos.htm>. Consultado en 11/05/2011.
- Lopez- Valeiras, J.M.(1993). *Iluminación de Museos*. B. Anabad. ISSN 0210-4164, 1984 (2º edición 1993): pp. 211-238.
- Maciel Linhares J.M.; Araujo Pinto, PD.; Nascimento,S.M. (2010). Color rendering under CIE illuminant for normal and color deficient observers . En *Journal of the Optical Society of America*: **26** (7) 1668-1677.
- Martinez,K.(1991). High resolution digital imaging of paintings. The Vasari Project. En *Microcomputers for information managements* **8** (4) 277-283.
- Martinez,K. et al.(2002). Ten years of art imaging research . En *Proceedings of the IEEE*: **90** (1) 28-41.
- Martinez,K et al (2008). Multi-spectral imaging for art digital imaging. En *Applied optics*. **47** (25) 48-54.
- Martinez et al.(2010). Spectral variability of Light-emmiting diodes with angle. En *5th European Conference on Colour in Graphics, Imaging, and vision* (pp. 547-553). Joensuu, Finland: Society for imaging Science and Technology.
- Martinez- Verdú et al (2010). Una metodología eficaz para la caracterización del color por medidas de contacto en rocas graníticas. En *Óptica pura y aplicada* **41** (4) 389-396.
- Michalski, Stefan (1987). Damage to Museum objects by visible radiation and ultraviolet radiation. En *Proceedings of the Conference on Lighting Museums, Galleries and Historic Houses* (pp. 5-16). London, UK: The Museums Association.
- Michalski, Stefan (1990). Towards specific lighting guidelines. En *9<sup>th</sup>. Triennial Meeting. Committee on Conservation*. Dresden. Germany: ICOM.
- Michalski, Stefan. (1994). Slide rule to determine light damage. En *Special Publication. Canadian Conservation Institute* (pp.11) . Ottawa,Canada: CCI.
- Michalski, Stefan (2007). From standards to best practices to risk assessment: Where have we been and where are we going? En *Museum Exhibit Lighting: Classic Issues, New Light*. Richmond. Va., U.S: AIC.
- Michalski, Stefan (2007) .Summary of Issues in Museum Exhibit Lighting 2007. En *Classic Issues, New Light. AIC Annual Meeting*. Richmond, Va., U.S: AIC.
- Michalski, Stefan (2009). *Temperatura y Humedad Relativa incorrectas*. Canadian Conservation Institute. Ottawa, Canada. En <http://www.cci-icc.gc.ca/crc/articles/mcpm/chap09-spa.pdf> . Consultado 20/06/2011.

- Miller, Jack. (2005). *Museum Lighting: Pure and simple*. Seaford, DE, U.S: NoUVIR Research. Obtenido de <http://www.nouvir.com/pdfs/MuseumLighting.pdf>. Consultado en 10/07/2011.
- Miller, Jack. (2006). Light and Matter. The dangerous romance: applied quantum physics theory for museum illumination. En *Research report. Nouvir Research*. Seaford, Delaware, US: pp.8-45.
- MLPP.(1998). *Museum Lighting Protocol Project*. Lighting Research Center Rensselaer Polytechnic Institute. New York, US. En <http://cool.conservation-us.org/coolaic/sg/rats/currentresearch.html> Consultado 20/03/2011.
- Negrete, Jorge et al.(2008). *Estrategias y Pautas Bioclimáticas en la Zona Rural de la Provincia de Tucumán Valle Calchaquí*: Proyecto de Investigación CIUNT 26/B211.UNT. [cd - rom]. C. A. A.II. 300 p. Edición Digital, propiedad intelectual N°: 147685 de la D. N. D. A: pp. 92-110.
- Nottoli, F.(2005) . Museos y casas transformadas. En *La iluminación natural en edificios no domésticos* (pp: 25-46). Buenos Aires , Argentina: Ed. Eudeba.
- Pattini, Andrea.(2007). *Integración de la luz natural en escuelas de Mendoza, Arg.* Tesis doctoral. Ed. EDIUNT. Departamento de Luminotecnia, Luz y visión. Universidad Nacional de Tucumán, R.A: pp.77-81.
- Perales , Esther et al (2010). Analysis of the colorimetric properties of goniochromatic colors using the MacAdam limits under different light sources. En *Applied Optics*. **50** (27) 5271-5278.
- Porter, Judie.(2003). Draft lighting applications evaluation. En *Report to The California Energy Commission*. Ligthing Research Center. **2** (3) 3-10.
- Ribes, A. et al.(2005). Calibration and spectral reconstruction for CRISATEL: An art painting multispectral acquisition system . En *Journal of imaging science and technology* **49** (6) 563-573.
- Rico, Juan Carlos.(2009). La iluminación de museos. En *Los conocimientos técnicos: Museos, Arquitectura y Arte* (pp. 155-170). Madrid, España: Sílex Ediciones.
- Round, H. J.(1907). *A Note on Carborundum*. En *Electrical World Pub*. **4** (19) 309.
- Saunders,D. and Kirby, J.(1994). Wavelength-dependent fading of artist’s pigments. En *Proceedings of the International Institute of Conservation Congress*. London, UK: pp. 165-172.
- Saunders, D.and Kirby.(2002). The Effect of relative humidity on artist’s pigments. En *British National Gallery .Technical Bulletin* 25: pp. 62-72.
- Seuntiëns, PHJ., Vogels, IMLC., Kraaijenbrink.(2007). Visibility of Hue, Saturation and Luminance deviations in LEDs. En *Proceedings of SPIE*: pp. 84-92.
- Serra, R., Coch, H.(1995). Clima y edificio.En *Arquitectura y Clima* (pp.34-40). Barcelona, España: Edicions ETSA-UPC.
- Shaw, Kevan (2008). LED technology for lighting folks. In *Lecture delivered at Lightfair international*. Las vegas, NV,U.S: LI
- Shaw, Kevan (2010). Museum Lighting in the second decade of the 21<sup>st</sup> century. En *Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE/SLL LG8)*: pp.28-35.

- Thanachareonkit, A., Scartezzini, J-L., Andersen, M.(2007). Comparing Daylight performance assessment of buildings in scale models and test modules. En *Solar Energy*. **79** (2) 168-182.
- Thomson,G. (1994). Controlling visible radiation. En Butterworth-Heinemann Ed. *The museum environment* (pp. 23-26). Oxford, UK : Ed. ELSEVIER B.H.
- Thomson,G. (1994). Light and heat energy. En Butterworth-Heinemann Ed. *The museum environment* (pp. 2-4). Oxford, UK : Ed. ELSEVIER B.H.
- Thomson,G. (1994). Light and heat energy. En Butterworth-Heinemann Eds. *The museum environment* (pp. 2-4). Oxford, UK : Ed. ELSEVIER B.H.
- Thomson,G. (1994). Colour rendering. En Butterworth-Heinemann Eds. *The museum environment* (pp. 50-51). Oxford, UK : Ed. ELSEVIER B.H.
- Thomson,G. (1994). Light 1 .Angle at which light falls on exhibits. En Butterworth-Heinemann Eds. *The museum environment* (pp. 35-36). Oxford, UK : Ed. ELSEVIER B.H.
- Thomson,G.(2006). A new look at color rendering, levels of illumination, and protection from ultraviolet radiation in museum lighting. In *Studies in Conservation*”**6** (2) 49-70.
- Thomson, G.(2008). The museum environment. 9th. Edition. Series in conservation and museology. Oxford, UK: Ed.ELSEVIER Butterworth-Heinemann. 293 p.
- Thomson,G. (2008). Light 2 .The primal photochemical reaction. En Butterworth-Heinemann Eds. *The museum environment* (pp. 193-195). Oxford, UK : Ed. ELSEVIER B.H.
- Thomson,G. (2008). Light 2 .Activation energy. En Butterworth-Heinemann Eds. *The museum environment* (pp. 188-193). Oxford, UK : Ed. ELSEVIER B.H.
- Thomson,G. (2008). Light 1 .Light and heat energy. En Butterworth-Heinemann Eds. *The museum environment* (pp.4). Oxford, UK : Ed. ELSEVIER B.H.
- Thomson,G. (2008). Light 2. Damage versus wavelength. En Butterworth-Heinemann Eds. *The museum environment* (pp.184-186). Oxford, UK : Ed. ELSEVIER B.H.
- Thomson,G. (2008). Light 1. Colours and materials which change. En Butterworth-Heinemann Eds. *The museum environment* (pp.10-15). Oxford, UK : Ed. ELSEVIER B.H.
- Thomson,G. (2008). Light 1. 200 lux–daylight and artificial light. En Butterworth-Heinemann Eds. *The museum environment* (pp.28-32). Oxford, UK : Ed. ELSEVIER B.H.
- Torres Portero, M.; Casado Lou, J.L. (2008). La exhibición en el museo. En “*Diseño de Iluminación de museos*” (pp.154-170). Zaragoza,España: Ed. Universidad de Zaragoza.
- Townsend, H.J., Hackney,S., Lerwill,A and Thomas,J.(2007). *Managing colour in digital Processes and Arts Conservation Science*. Bristol,UK. :Tate. UWE.
- UN,2011. “UNEP year book 2011: *Emerging issues in our global environment*. En <http://www.unep.org/yearbook/2011/> Consultado el 12/01/2012.
- Van der Plas, R. J., y A. B. de Graff (1988). Comparación de lámparas domésticas en países en desarrollo. En *Industry & Energy Department, World Bank*. Washington DC, US. Energy Issues Paper. **6** (1) 1232-1234.

- Vilaseca, M; Pujol, J.; Arjona M.;De Lazarte, M.( 2006). Multispectral system for reflectance reconstruction in the near-infrared region. En *Optical Society of America. Applied optics*. June, 2006: **26** (7) 1668-1677.
- Vilaseca, M; Pujol, J.; Arjona M.;De Lazarte, M.( 2008) Characterization of the human iris spectral reflectance with multispectral imaging system . En *Optical Society of America. Applied optics*. October, 2006. Vol. **47** (30) 5622-5630.
- Vincitorio,F.,Ramil,A.,Lopez,A. (2010). Luz Holografía. Arte y Preservación. En *X Congreso Panamericano de Iluminación*, 2010 (pp.197-203). Valparaíso, Chile: Luxamérica 2010.
- Whitmore, P. (1999). Predicting the fading of objects: identification of fugitive colorants through direct nondestructive lightfastness measurements. En *Journal of the American Institute for Conservation*. **38** (2) 395-409.
- Whitmore, P. (2002). Contribution to conservation science. En *A collection of Robert Feller's published studies on artist's paints, paper, and varnishes* (pp.665-671). Pittsburg, U.S: Carnegie Mellon University Press.
- Yang,G., Jung,H., Spencer,B.(2001). *Dinamic models of Full-scale MR dampers for civil engineering applications*. En [http://sstl.cee.illinois.edu/papers/us-japan\\_workshop.pdf](http://sstl.cee.illinois.edu/papers/us-japan_workshop.pdf)  
Consultado 12/01/2012.

## APÉNDICES.

### APÉNDICE A1. Hoja de datos del instrumento de medición.

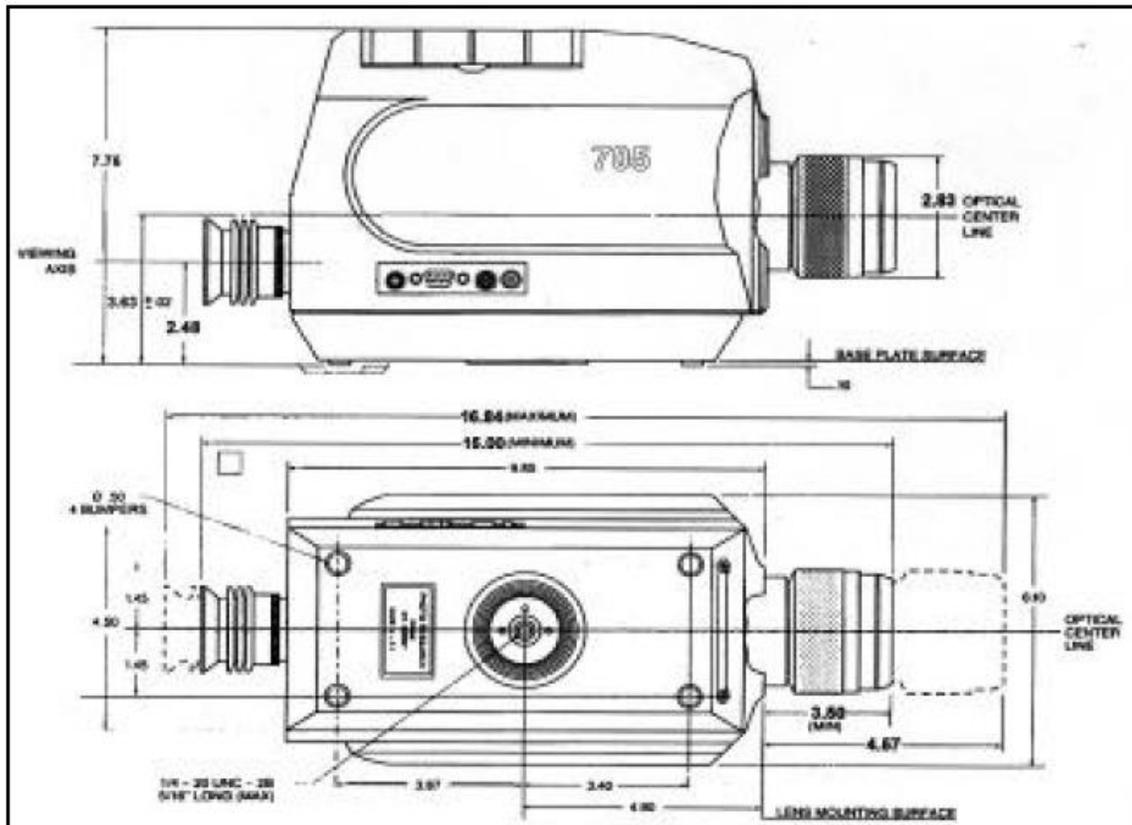
**SpectraWin™ Windows® Software** - For an easy-to-use, graphics based link to the PR-705 / 715, the optional *SpectraWin* software package provides a fully functional control, display and calculation platform. Features such as automated measurement sequences (reflectance, transmittance etc.), go/no go color measurements and a built in macro recorder make your measurement task as easy as point and shoot.

#### Specifications

Wavelength Range	PR-705: 380 - 780 nm PR-715: 380 - 1068 nm
Spectral Accuracy	PR-705: ± 2 nm PR-715: ± 4 nm
Spectral Bandwidth	≥ 2.5 nm. Bandwidth is dependent on aperture height and wavelength dispersion.
Available Apertures	2°, 1°, 1/2°, 1/4°, 1/8°. Select at time of purchase. Special horizontal aperture slits available.
Minimum Measuring Area	0.12 mm (0.005") with Standard MS-55 lens and 1/8° aperture 0.02 mm (0.001") with MS-5X lens and 1/8° aperture
Luminance Sensitivity for Illuminant A	0.003 cd/m <sup>2</sup> (0.001 fl) for 2° aperture and MS-55 lens
Luminance Accuracy	± 2% to NIST traceable luminance standard at 2856 K

#### Sensitivity Chart

ACCESS.	DISTANCE	UNITS	APERTURE SIZE (DEGREES)				
			2°	1°	1/2°	1/4°	1/8°
MS-55	1.75 in. to ∞ (44 mm to ∞)	fl (cd/m <sup>2</sup> )	0.001-500 (0.003-1.7K)	0.003 2K (0.01-6.8K)	0.012-8K (0.04-27.4K)	0.048-32K (0.16-109.6K)	0.192-128K (0.66-438K)
MS-1X	3.80 in. (97 mm)	fl (cd/m <sup>2</sup> )	0.001-500 (0.003-1.7K)	0.003 2000 (0.01-6.8K)	0.012-8K (0.04-27.4K)	0.048-32K (0.16-109.6K)	0.192-128K (0.66-438K)
MS-2.5X	1.76 in. (45 mm)	fl (cd/m <sup>2</sup> )	0.001-500 (0.003-1.7K)	0.003 2K (0.01-6.8K)	0.012-8K (0.04-27.4K)	0.048-32K (0.16-109.6K)	0.192-128K (0.66-438K)
MS-5X	1.11 in. (28 mm)	fl (cd/m <sup>2</sup> )	0.0015-750 (0.0025-2.5K)	0.0045-3K (0.014-10.2K)	0.018-12K (0.06-41K)	0.072-48K (0.24-164K)	0.288-192K (0.96-656K)
MS-77	4.25 in. (108 mm)	fl (cd/m <sup>2</sup> )	0.0015-750 (0.0025-2.5K)	0.0045-3K (0.014-10.2K)	0.018-12K (0.06-41K)	0.072-48K (0.24-164K)	0.288-192K (0.96-656K)
FP-55 Fiber Probe	NA	fl (cd/m <sup>2</sup> )	0.0015-750 (0.0025-2.5K)	0.0045-3K (0.014-10.2K)	0.018-12K (0.06-41K)	0.072-48K (0.24-164K)	0.288-192K (0.96-656K)
CR-55 Cosine Receptor	NA	fc lux	0.004-2K (0.043-21.5K)	0.012-8K (0.13-86K)	0.048-32K (0.52-344K)	0.192-128K (2.06-137.5K)	0.768-512K (3.072-550K)



**APÉNDICE B1. Muestra Mondrian 1921. Perfil de Reflectancia Espectral Representativos (P.R.E.R.) ; Perfil de Emisión Espectral (P.E.E.) MATCH 1 y Perfiles espectrales de los colores de la muestra calculados según su diferencia de color bajo D65.**

	M1 PERFIL	POT	M1 PERFIL	Perfiles espectrales de los Colores de M2 del cálculo de Diferencia de Color L*a*b*		
	REFLECTANCIA		EMISIÓN	Rojo	Amarillo	Azul
	ESPECTRAL		ESPECTRAL	M1	M4	M14
	REPRESENTATIVO		MATCH 1	Resultado Diferencia de color comp. Match 1-D65		
Longitud de onda				3,22	2,24	1,27
400	1,3434E-01	10	1,3434E+00	6,6577E-02	3,0888E-02	2,9450E-02
410	1,2792E-01	10	1,2792E+00	6,6119E-02	2,8783E-02	2,5315E-02
420	1,2197E-01	10	1,2197E+00	4,7478E-02	1,8411E-02	2,4786E-02
430	1,2130E-01	10	1,2130E+00	4,0842E-02	1,6899E-02	2,5512E-02
440	1,2111E-01	10	1,2111E+00	3,8474E-02	1,6730E-02	2,7299E-02
450	1,2119E-01	10	1,2119E+00	3,9388E-02	1,6795E-02	2,8470E-02
460	1,2228E-01	10	1,2228E+00	4,1402E-02	1,8530E-02	2,8883E-02
470	1,2321E-01	10	1,2321E+00	4,4149E-02	2,0745E-02	2,7809E-02
480	1,2388E-01	10	1,2388E+00	4,6169E-02	2,3700E-02	2,6203E-02
490	1,2554E-01	10	1,2554E+00	4,8990E-02	2,9178E-02	2,4306E-02
500	1,2792E-01	10	1,2792E+00	5,1685E-02	3,8970E-02	2,2484E-02
510	1,2969E-01	10	1,2969E+00	5,0294E-02	4,9224E-02	1,9967E-02
520	1,2983E-01	10	1,2983E+00	4,7049E-02	5,4849E-02	1,7592E-02
530	1,2989E-01	10	1,2989E+00	4,6272E-02	5,6981E-02	1,6163E-02
540	1,2977E-01	10	1,2977E+00	4,6183E-02	5,7531E-02	1,4740E-02
550	1,2876E-01	10	1,2876E+00	4,4170E-02	5,6361E-02	1,2988E-02
560	1,2810E-01	10	1,2810E+00	4,3082E-02	5,5336E-02	1,1512E-02
570	1,2857E-01	10	1,2857E+00	4,4929E-02	5,6358E-02	1,0537E-02
580	1,3157E-01	10	1,3157E+00	5,4918E-02	6,2037E-02	1,0149E-02
590	1,3789E-01	10	1,3789E+00	7,8106E-02	7,2279E-02	1,0059E-02
600	1,4609E-01	10	1,4609E+00	1,1234E-01	8,2423E-02	9,8980E-03
610	1,5349E-01	10	1,5349E+00	1,4627E-01	8,9070E-02	9,6581E-03
620	1,5788E-01	10	1,5788E+00	1,6685E-01	9,2330E-02	9,5074E-03
630	1,5928E-01	10	1,5928E+00	1,7490E-01	9,2930E-02	9,4096E-03
640	1,6012E-01	10	1,6012E+00	1,7861E-01	9,3312E-02	9,6252E-03
650	1,6048E-01	10	1,6048E+00	1,8160E-01	9,3161E-02	1,0334E-02
660	1,6162E-01	10	1,6162E+00	1,8544E-01	9,3223E-02	1,1421E-02
670	1,6243E-01	10	1,6243E+00	1,8802E-01	9,3372E-02	1,2445E-02
680	1,6366E-01	10	1,6366E+00	1,8997E-01	9,3789E-02	1,3669E-02
690	1,6512E-01	10	1,6512E+00	1,9475E-01	9,3671E-02	1,5874E-02
700	1,6727E-01	10	1,6727E+00	2,0134E-01	9,3985E-02	1,9257E-02

**APÉNDICE B2. Muestra M2. Klee Farbtable. Perfil de Reflectancia Espectral Representativo (P.R.E.R.) ; Perfil de Emisión Espectral (P.E.E.) MATCH 2 y Perfiles espectrales de los colores de la muestra calculados según su diferencia de color bajo D65.**

	M2	MATCH M2	Perfil espectral de los colores de la muestra. Cálculo de diferencia de color comp. Match2-D65			
	PERFIL DE REFLECTANCIA	PERFIL DE EMISIÓN	M2	M2	M2b	M2c
	ESPECTRAL	ESPECTRAL	19	47	20	12
Longitud de onda	REPRESENTATIVO		RESULTADO DEL CÁLCULO DE VARIACIÓN DE COLOR. MATCH2 - D65			
			2,30	2,13	1,30	1,19
400	3,9512E-03	3,9512E-02	1,0460E-02	1,3046E-02	1,0172E-02	1,0071E-02
410	3,6136E-03	3,6136E-02	7,6337E-03	8,1565E-03	1,0056E-02	1,0301E-02
420	2,9568E-03	2,9568E-02	5,5713E-03	6,3469E-03	7,9969E-03	8,9702E-03
430	2,8366E-03	2,8366E-02	4,5203E-03	5,5120E-03	6,7841E-03	8,7858E-03
440	2,9109E-03	2,9109E-02	4,5505E-03	5,3659E-03	6,6843E-03	9,2675E-03
450	3,0425E-03	3,0425E-02	4,7644E-03	5,6008E-03	6,8193E-03	9,5619E-03
460	3,1278E-03	3,1278E-02	4,8176E-03	5,9402E-03	7,3596E-03	9,7895E-03
470	3,1698E-03	3,1698E-02	5,0365E-03	6,6513E-03	8,1687E-03	9,5052E-03
480	3,2227E-03	3,2227E-02	4,9274E-03	7,6963E-03	9,3264E-03	9,1226E-03
490	3,3199E-03	3,3199E-02	5,1774E-03	9,5283E-03	1,1491E-02	8,5548E-03
500	3,5166E-03	3,5166E-02	5,1846E-03	1,2649E-02	1,4871E-02	8,0568E-03
510	3,6008E-03	3,6008E-02	4,8002E-03	1,6668E-02	1,8381E-02	7,1708E-03
520	3,5474E-03	3,5474E-02	4,2807E-03	1,9374E-02	2,0207E-02	6,4129E-03
530	3,4703E-03	3,4703E-02	4,2384E-03	2,0436E-02	2,0326E-02	5,9222E-03
540	3,3643E-03	3,3643E-02	4,2810E-03	2,0729E-02	1,9539E-02	5,4720E-03
550	3,1635E-03	3,1635E-02	4,0960E-03	2,0497E-02	1,8133E-02	4,9085E-03
560	2,9576E-03	2,9576E-02	3,9367E-03	2,0029E-02	1,6527E-02	4,3470E-03
570	2,9059E-03	2,9059E-02	4,1570E-03	2,0221E-02	1,5216E-02	4,0827E-03
580	3,0933E-03	3,0933E-02	5,0079E-03	2,1367E-02	1,4434E-02	4,0032E-03
590	3,5887E-03	3,5887E-02	7,0528E-03	2,3334E-02	1,4094E-02	4,0243E-03
600	4,2509E-03	4,2509E-02	1,0062E-02	2,5202E-02	1,3900E-02	4,0095E-03
610	4,8462E-03	4,8462E-02	1,2934E-02	2,6384E-02	1,3599E-02	3,9333E-03
620	5,1415E-03	5,1415E-02	1,4527E-02	2,6879E-02	1,3284E-02	3,8255E-03
630	5,2336E-03	5,2336E-02	1,4986E-02	2,6938E-02	1,3172E-02	3,8112E-03
640	5,2976E-03	5,2976E-02	1,5358E-02	2,6935E-02	1,3328E-02	3,8933E-03
650	5,4421E-03	5,4421E-02	1,6047E-02	2,7077E-02	1,3986E-02	4,1782E-03
660	5,6111E-03	5,6111E-02	1,6814E-02	2,7158E-02	1,4924E-02	4,6054E-03
670	5,7441E-03	5,7441E-02	1,7431E-02	2,7144E-02	1,5659E-02	4,9863E-03
680	5,8624E-03	5,8624E-02	1,7852E-02	2,7219E-02	1,6203E-02	5,4710E-03
690	6,1273E-03	6,1273E-02	1,8943E-02	2,7332E-02	1,7532E-02	6,3220E-03
700	6,5295E-03	6,5295E-02	2,0646E-02	2,7533E-02	1,9705E-02	7,6968E-03

**APÉNDICE B3. Muestra M3. Klee Arkitekturder. Perfil de Reflectancia Espectral Representativo (P.R.E.R.) ; Perfil de Emisión Espectral (P.E.E.) MATCH3 y Perfiles espectrales de los colores de la muestra calculados según su diferencia de color bajo D65.**

Long. Onda	Perfil de Reflectancia Espectral Representativo	POT	PERFIL DE EMISIÓN ESPECTRAL MATCH3	Perfiles espectrales de los colores de M3 para Cálculo de diferencia de color.			
	M3 PRER		MATCH3	Perfil M3 d5	Perfil M3 c8	Perfil M3 b6	Perfil M3 42
	Resultados de Diferencia de color. Comparados Iluminantes Match 3-D65						
				0,33	2,17	0,24	2,04
400	3,5670E-03	10	3,5670E-02	2,0988E-02	1,9023E-02	2,0464E-03	8,4293E-03
410	3,0238E-03	10	3,0238E-02	1,8896E-02	1,9986E-02	2,0615E-03	5,0551E-03
420	2,5516E-03	10	2,5516E-02	1,6419E-02	1,4518E-02	1,6592E-03	3,4956E-03
430	2,4291E-03	10	2,4291E-02	1,6276E-02	1,4346E-02	1,5808E-03	3,2036E-03
440	2,4586E-03	10	2,4586E-02	1,7047E-02	1,4447E-02	1,6061E-03	3,1087E-03
450	2,5448E-03	10	2,5448E-02	1,7867E-02	1,4951E-02	1,6987E-03	3,2352E-03
460	2,6853E-03	10	2,6853E-02	1,8993E-02	1,5350E-02	1,8042E-03	3,5317E-03
470	2,8354E-03	10	2,8354E-02	1,9471E-02	1,6181E-02	1,8377E-03	4,0220E-03
480	3,0211E-03	10	3,0211E-02	1,9708E-02	1,6794E-02	1,8552E-03	4,7018E-03
490	3,2660E-03	10	3,2660E-02	2,0170E-02	1,7676E-02	1,9030E-03	5,8271E-03
500	3,5843E-03	10	3,5843E-02	2,0263E-02	1,8256E-02	1,9011E-03	7,7491E-03
510	3,7700E-03	10	3,7700E-02	1,9055E-02	1,7744E-02	1,7829E-03	1,0053E-02
520	3,7766E-03	10	3,7766E-02	1,7518E-02	1,6891E-02	1,6553E-03	1,1432E-02
530	3,7290E-03	10	3,7290E-02	1,6420E-02	1,6541E-02	1,5607E-03	1,1943E-02
540	3,6655E-03	10	3,6655E-02	1,5414E-02	1,6534E-02	1,4839E-03	1,2103E-02
550	3,4808E-03	10	3,4808E-02	1,3783E-02	1,5666E-02	1,3569E-03	1,1799E-02
560	3,2921E-03	10	3,2921E-02	1,2328E-02	1,4913E-02	1,2285E-03	1,1443E-02
570	3,2480E-03	10	3,2480E-02	1,1562E-02	1,5421E-02	1,1763E-03	1,1496E-02
580	3,4133E-03	10	3,4133E-02	1,1529E-02	1,7798E-02	1,1876E-03	1,2250E-02
590	3,7748E-03	10	3,7748E-02	1,1756E-02	2,2803E-02	1,2195E-03	1,3528E-02
600	4,1536E-03	10	4,1536E-02	1,1893E-02	2,8797E-02	1,2316E-03	1,4737E-02
610	4,4223E-03	10	4,4223E-02	2,3549E-02	3,3700E-02	1,2153E-03	1,5520E-02
620	4,5218E-03	10	4,5218E-02	1,1561E-02	3,5987E-02	1,2004E-03	1,5824E-02
630	4,5459E-03	10	4,5459E-02	1,1538E-02	3,6551E-02	1,1885E-03	1,5883E-02
640	4,6193E-03	10	4,6193E-02	1,1855E-02	3,7408E-02	1,2193E-03	1,6014E-02
650	4,7494E-03	10	4,7494E-02	1,2722E-02	3,8658E-02	1,3093E-03	1,6198E-02
660	4,9345E-03	10	4,9345E-02	1,3959E-02	4,0247E-02	1,4346E-03	1,6431E-02
670	5,0910E-03	10	5,0910E-02	1,5153E-02	4,1494E-02	1,5593E-03	1,6585E-02
680	5,2416E-03	10	5,2416E-02	1,6433E-02	4,2662E-02	1,6791E-03	1,6718E-02
690	5,5147E-03	10	5,5147E-02	1,8799E-02	4,4678E-02	1,9144E-03	1,6992E-02
700	5,9308E-03	10	5,9308E-02	2,2546E-02	4,7802E-02	2,2884E-03	1,7460E-02

**APÉNDICE B4. Muestra M4. Klee. Highway. Perfil de Reflectancia Espectral Representativo (P.R.E.R.) ; Perfil de Emisión Espectral (P.E.E.) MATCH4 y Perfiles espectrales de los colores de la muestra calculados según su diferencia de color bajo D65.**

Long onda			MATCH M4	Perfiles espectrales de los colores de M4 para calcular Diferencias de Color			
	M4 PERFIL	PO T	PERFIL	M4	M4	M4	M4
	REFLECTANCIA		DE EMISIÓN	a 50	c 50	e 33	g 40
	ESPECTRAL		ESPECTRAL	Resultados de Diferencia de color. Comparados Iluminantes Match 4 -D65			
REPRESENTATIV A			0,22	0,06	0,11	0,44	
400	9,9297E-04	10	9,9297E-03	9,3441E-04	1,0509E-03	7,9586E-04	8,2904E-04
410	7,7856E-04	10	7,7856E-03	6,2591E-04	9,3006E-04	5,6351E-04	8,1344E-04
420	7,1376E-04	10	7,1376E-03	5,8657E-04	8,0731E-04	4,2342E-04	8,6832E-04
430	6,9437E-04	10	6,9437E-03	5,5102E-04	8,0921E-04	3,9733E-04	8,8597E-04
440	7,2306E-04	10	7,2306E-03	5,6112E-04	8,1299E-04	3,9135E-04	9,7661E-04
450	7,4348E-04	10	7,4348E-03	5,8687E-04	8,2108E-04	4,0996E-04	1,0349E-03
460	7,6793E-04	10	7,6793E-03	6,1461E-04	8,4134E-04	4,3122E-04	1,0613E-03
470	7,8923E-04	10	7,8923E-03	6,5873E-04	8,5197E-04	4,5343E-04	1,0545E-03
480	8,1256E-04	10	8,1256E-03	7,1293E-04	8,8010E-04	4,9428E-04	1,0254E-03
490	8,4849E-04	10	8,4849E-03	7,8482E-04	9,1853E-04	5,4627E-04	9,9237E-04
500	8,9734E-04	10	8,9734E-03	8,8636E-04	9,6714E-04	6,1958E-04	9,4706E-04
510	9,1095E-04	10	9,1095E-03	9,4394E-04	9,9633E-04	6,5283E-04	8,7279E-04
520	8,8750E-04	10	8,8750E-03	9,3333E-04	9,8696E-04	6,4670E-04	7,8677E-04
530	8,4524E-04	10	8,4524E-03	8,8035E-04	9,6096E-04	6,2462E-04	7,0347E-04
540	7,9728E-04	10	7,9728E-03	8,0736E-04	9,3470E-04	6,0141E-04	6,2359E-04
550	7,3043E-04	10	7,3043E-03	7,1723E-04	8,8541E-04	5,5914E-04	5,3380E-04
560	6,6773E-04	10	6,6773E-03	6,3157E-04	8,3689E-04	5,1783E-04	4,5700E-04
570	6,2650E-04	10	6,2650E-03	5,6051E-04	8,1509E-04	5,0388E-04	3,9991E-04
580	6,1935E-04	10	6,1935E-03	5,1376E-04	8,3321E-04	5,3000E-04	3,6034E-04
590	6,4282E-04	10	6,4282E-03	4,8906E-04	8,9702E-04	6,0029E-04	3,3941E-04
600	6,7435E-04	10	6,7435E-03	4,7442E-04	9,6743E-04	6,7813E-04	3,2456E-04
610	6,9190E-04	10	6,9190E-03	4,5947E-04	1,0112E-03	7,2315E-04	3,1623E-04
620	6,9649E-04	10	6,9649E-03	4,5062E-04	1,0286E-03	7,3953E-04	3,1146E-04
630	6,9809E-04	10	6,9809E-03	4,4852E-04	1,0338E-03	7,4177E-04	3,0929E-04
640	7,0833E-04	10	7,0833E-03	4,5931E-04	1,0469E-03	7,5221E-04	3,1830E-04
650	7,3301E-04	10	7,3301E-03	4,8472E-04	1,0703E-03	7,8369E-04	3,3775E-04
660	7,6550E-04	10	7,6550E-03	5,2447E-04	1,0976E-03	8,2201E-04	3,6581E-04
670	7,9616E-04	10	7,9616E-03	5,5461E-04	1,1276E-03	8,5242E-04	3,9437E-04
680	8,2523E-04	10	8,2523E-03	5,8938E-04	1,1551E-03	8,8153E-04	4,2889E-04
690	8,7993E-04	10	8,7993E-03	6,5246E-04	1,2022E-03	9,4304E-04	4,8666E-04
700	9,6388E-04	10	9,6388E-03	7,5015E-04	1,2702E-03	1,0402E-03	5,7363E-04

**APÉNDICE C1. Cálculo del Factor deteriorante (F.D.) para el Iluminante A (CIE) y la muestra M1 del capítulo 4.**

CÁLCULO DE FACTOR DETERIORANTE. ILUMINANTE A. MUESTRA M1.								
Longitud de onda	M1 P.R.E.R	Iluminante		7,05		Coeficiente de escala		
		A	M1 P.R.E.R	0,14	0,98			
400	1,3434E-01	1,4710E-01	9,4664E-01					
410	1,2792E-01	1,7680E-01	9,0141E-01				0,0000	
420	1,2197E-01	2,0990E-01	8,5947E-01				0,0000	
430	1,2130E-01	2,4670E-01	8,5478E-01				0,0000	
440	1,2111E-01	2,8700E-01	8,5341E-01				0,0000	
450	1,2119E-01	3,3090E-01	8,5397E-01				0,0000	
460	1,2228E-01	3,7810E-01	8,6169E-01				0,0000	
470	1,2321E-01	4,2870E-01	8,6824E-01				0,0000	
480	1,2388E-01	4,8240E-01	8,7299E-01				0,0000	
490	1,2554E-01	5,3910E-01	8,8467E-01				0,0000	
500	1,2792E-01	5,9860E-01	9,0141E-01			0,0000	0,00	0,00
510	1,2969E-01	6,6060E-01	9,1393E-01			0,0000		
520	1,2983E-01	7,2500E-01	9,1490E-01			0,0000		
530	1,2989E-01	7,9130E-01	9,1530E-01			0,0000		
540	1,2977E-01	8,5950E-01	9,1448E-01			0,0000		
550	1,2876E-01	9,2910E-01	9,0731E-01	0,0218	0,0000			
560	1,2810E-01	1,0000E+00	9,0267E-01	0,0973	0,5956			
570	1,2857E-01	1,0718E+00	9,0602E-01	0,1658	1,3155			
580	1,3157E-01	1,1444E+00	9,2713E-01	0,2173	1,9152			
590	1,3789E-01	1,2173E+00	9,7167E-01	0,2456	2,3145			
600	1,4609E-01	1,2904E+00	1,0294E+00	0,2610	2,5329	8,23	6,17	
610	1,5349E-01	1,3635E+00	1,0816E+00	0,2819	2,7141			
620	1,5788E-01	1,4362E+00	1,1125E+00	0,3237	3,0276			
630	1,5928E-01	1,5084E+00	1,1224E+00	0,3860	3,5484			
640	1,6012E-01	1,5798E+00	1,1283E+00	0,4515	4,1876			
650	1,6048E-01	1,6503E+00	1,1309E+00	0,5194	4,8545			
660	1,6162E-01	1,7196E+00	1,1389E+00	0,5807	5,5004			
670	1,6243E-01	1,7877E+00	1,1446E+00	0,6431	6,1190			
680	1,6366E-01	1,8543E+00	1,1533E+00	0,7010	6,7208			
690	1,6512E-01	1,9193E+00	1,1636E+00	0,7557	7,2838			
700	1,6727E-01	1,9826E+00	1,1787E+00	0,8039	7,7979	51,75	5,18	<b>11,35</b>

**APÉNDICE C2. Cálculo del Factor deteriorante (F.D.) para el Iluminante D65 (CIE) y la muestra M1 del capítulo 4.**

<b>CÁLCULO DE FACTOR DETERIORANTE. ILUMINANTE D65 . MUESTRA M1.</b>									
Longitud de onda	M1	Iluminante	Coeficiente de escala						
	P.R.E.R	D65	6,85	M1 'P.R.E.R	0,14	0,95			
400	1,3434E-01	8,2750E-01		9,2082E-01					
410	1,2792E-01	9,1490E-01		8,7682E-01	0,0381	0,1904			
420	1,2197E-01	9,3430E-01		8,3603E-01	0,0983	0,6818			
430	1,2130E-01	8,6680E-01		8,3146E-01	0,0353	0,6680			
440	1,2111E-01	1,0486E+00		8,3014E-01	0,2185	1,2690			
450	1,2119E-01	1,1701E+00		8,3068E-01	0,3394	2,7894			
460	1,2228E-01	1,1781E+00		8,3819E-01	0,3399	3,3967			
470	1,2321E-01	1,1486E+00		8,4456E-01	0,3040	3,2198			
480	1,2388E-01	1,1592E+00		8,4918E-01	0,3100	3,0703			
490	1,2554E-01	1,0881E+00		8,6054E-01	0,2276	2,6879			
500	1,2792E-01	1,0935E+00		8,7682E-01	0,2167	2,2212	20,19	20,19	
510	1,2969E-01	1,0780E+00		8,8901E-01	0,1890	2,0284			
520	1,2983E-01	1,0479E+00		8,8994E-01	0,1580	1,7348			
530	1,2989E-01	1,0769E+00		8,9034E-01	0,1866	1,7226			
540	1,2977E-01	1,0441E+00		8,8953E-01	0,1546	1,7056			
550	1,2876E-01	1,0405E+00		8,8256E-01	0,1579	1,5625			
560	1,2810E-01	1,0000E+00		8,7805E-01	0,1220	1,3995			
570	1,2857E-01	9,6330E-01		8,8131E-01	0,0820	1,0197			
580	1,3157E-01	9,5790E-01		9,0184E-01	0,0561	0,6902			
590	1,3789E-01	8,8690E-01		9,4517E-01		0,2803			
600	1,4609E-01	9,0010E-01		1,0014E+00		0,0000	12,14	9,11	
610	1,5349E-01	8,9600E-01		1,0521E+00		0,0000			
620	1,5788E-01	8,7700E-01		1,0822E+00		0,0000			
630	1,5928E-01	8,3290E-01		1,0918E+00		0,0000			
640	1,6012E-01	8,3700E-01		1,0975E+00		0,0000			
650	1,6048E-01	8,0030E-01		1,1001E+00		0,0000			
660	1,6162E-01	8,0210E-01		1,1079E+00		0,0000			
670	1,6243E-01	8,2280E-01		1,1134E+00		0,0000			
680	1,6366E-01	7,8280E-01		1,1218E+00		0,0000			
690	1,6512E-01	6,9720E-01		1,1318E+00		0,0000			
700	1,6727E-01	7,1610E-01		1,1466E+00		0,0000	0,00	0,00	<b>29,30</b>

**APÉNDICE C3. Cálculo del Factor deteriorante (F.D.) del Iluminador de lámparas a LED ajustado con el perfil de emisión espectral (P.E.E.) n° 63. Muestra M2. Etapa experimental.**

CÁLCULO DE FACTOR DETERIORANTE. ILUMINADOR PERFIL 63. MUESTRA M2.								
Long. De onda	M2 FE1 PRe	Iluminador		0,42 Coeficiente de igualación		0,0036	0,0015	
		63	M2FE1 'P.R.E.R					
400	3,6323E-03	2,4520E-05	1,52E-03					
410	3,0289E-03	3,7335E-05	1,27E-03		0,0000			
420	2,4050E-03	1,2050E-04	1,01E-03		0,0000			
430	2,3730E-03	4,0660E-04	9,93E-04		0,0000			
440	2,4420E-03	1,1080E-03	1,02E-03	0,0001	0,0004			
450	2,5509E-03	1,8700E-03	1,07E-03	0,0008	0,0044			
460	2,6071E-03	1,4110E-03	1,09E-03	0,0003	0,0056			
470	2,6489E-03	8,3190E-04	1,11E-03		0,0016			
480	2,6935E-03	5,5350E-04	1,13E-03		0,0000			
490	2,7909E-03	6,1505E-04	1,17E-03		0,0000			
500	2,9333E-03	1,0170E-03	1,23E-03		0,0000	0,01	0,01	
510	2,9870E-03	1,6600E-03	1,25E-03	0,0004	0,0021			
520	2,9840E-03	1,9510E-03	1,25E-03	0,0007	0,0056			
530	3,0114E-03	1,9445E-03	1,26E-03	0,0007	0,0069			
540	2,9716E-03	1,9310E-03	1,24E-03	0,0007	0,0069			
550	2,8337E-03	2,0070E-03	1,19E-03	0,0008	0,0075			
560	2,7679E-03	2,0760E-03	1,16E-03	0,0009	0,0087			
570	2,9089E-03	2,2015E-03	1,22E-03	0,0010	0,0095			
580	3,2978E-03	2,3610E-03	1,38E-03	0,0010	0,0098			
590	3,8842E-03	2,4810E-03	1,62E-03	0,0009	0,0092			
600	4,4393E-03	2,5610E-03	1,86E-03	0,0007	0,0078	0,15	0,11	
610	4,7418E-03	2,5630E-03	1,98E-03	0,0006	0,0064			
620	4,8456E-03	2,5950E-03	2,03E-03	0,0006	0,0057			
630	4,8894E-03	2,8630E-03	2,05E-03	0,0008	0,0069			
640	4,9628E-03	2,8370E-03	2,08E-03	0,0008	0,0079			
650	5,0602E-03	2,0495E-03	2,12E-03		0,0038			
660	5,0935E-03	1,5470E-03	2,13E-03		0,0000			
670	5,0010E-03	1,2285E-03	2,09E-03		0,0000			
680	4,9344E-03	9,3320E-04	2,06E-03		0,0000			
690	5,1490E-03	7,2210E-04	2,15E-03		0,0000			
700	5,6298E-03	5,4700E-04	2,35E-03		0,0000	0,03	0,01	<b>0,13</b>

**APÉNDICE C4. Cálculo del Factor deteriorante (F.D.) del perfil de emisión espectral (P.E.E.) de la lámpara Incandescente halogenada. Muestra M2. Etapa experimental.**

CÁLCULO DE FACTOR DETERIORANTE. LÁMPARA INCANDESCENTE HALOGENADA. MUESTRA M2.								
Longitud de onda	M2 FE1 PRER	LIH	M2 FE1 PRER'	Coeficiente de igualación				
				4,96	0,0036	0,0180		
400	3,6323E-03	8,5250E-04	1,8013E-02					
410	3,0289E-03	1,5829E-03	1,5021E-02		0,0000			
420	2,4050E-03	2,9053E-03	1,1926E-02		0,0000			
430	2,3730E-03	4,0409E-03	1,1768E-02		0,0000			
440	2,4420E-03	5,0980E-03	1,2110E-02		0,0000			
450	2,5509E-03	5,9131E-03	1,2650E-02		0,0000			
460	2,6071E-03	6,6915E-03	1,2929E-02		0,0000			
470	2,6489E-03	7,8051E-03	1,3136E-02		0,0000			
480	2,6935E-03	8,7715E-03	1,3357E-02		0,0000			
490	2,7909E-03	9,6986E-03	1,3840E-02		0,0000			
500	2,9333E-03	1,0920E-02	1,4546E-02		0,0000	0,00	0,00	
510	2,9870E-03	1,2418E-02	1,4812E-02		0,0000			
520	2,9840E-03	1,3273E-02	1,4798E-02		0,0000			
530	3,0114E-03	1,4420E-02	1,4934E-02		0,0000			
540	2,9716E-03	1,5690E-02	1,4737E-02	0,0010	0,0048			
550	2,8337E-03	1,7161E-02	1,4052E-02	0,0031	0,0203			
560	2,7679E-03	1,8030E-02	1,3726E-02	0,0043	0,0371			
570	2,9089E-03	1,9058E-02	1,4425E-02	0,0046	0,0447			
580	3,2978E-03	2,0413E-02	1,6354E-02	0,0041	0,0435			
590	3,8842E-03	2,1819E-02	1,9262E-02	0,0026	0,0331			
600	4,4393E-03	2,3355E-02	2,2015E-02	0,0013	0,0195	0,20	0,15	
610	4,7418E-03	2,4756E-02	2,3515E-02	0,0012	0,0129			
620	4,8456E-03	2,6165E-02	2,4029E-02	0,0021	0,0169			
630	4,8894E-03	2,8114E-02	2,4247E-02	0,0039	0,0300			
640	4,9628E-03	3,0065E-02	2,4611E-02	0,0055	0,0466			
650	5,0602E-03	3,1951E-02	2,5094E-02	0,0069	0,0616			
660	5,0935E-03	3,3528E-02	2,5259E-02	0,0083	0,0756			
670	5,0010E-03	3,4833E-02	2,4800E-02	0,0100	0,0915			
680	4,9344E-03	3,5390E-02	2,4470E-02	0,0109	0,1048			
690	5,1490E-03	3,6231E-02	2,5534E-02	0,0107	0,1081			
700	5,6298E-03	3,6940E-02	2,7918E-02	0,0090	0,0986	0,65	0,06	<b>0,22</b>

**APÉNDICE C5. Cálculo del Factor deteriorante (F.D.) del perfil de emisión espectral (P.E.E.) de la lámpara fluorescente compacta. Muestra M2. Etapa experimental.**

<b>CÁLCULO DE FACTOR DETERIORANTE. LÁMPARA FLUORESCENTE COMPACTA. MUESTRA M2.</b>								
Longitud de onda	Lámp. FC.	M2 FE1 PREr	Lámp. FC'	Coeficiente de igualación				
				2,10	0,0017	0,0036		
400	1,9480E-04	3,6323E-03	4,09E-04					
410	2,5560E-04	3,0289E-03	5,36E-04		0,0000			
420	5,9170E-04	2,4050E-03	1,24E-03		0,0000			
430	1,8425E-03	2,3730E-03	3,86E-03	0,0015	0,0075			
440	2,8740E-03	2,4420E-03	6,03E-03	0,0036	0,0254			
450	1,7495E-03	2,5509E-03	3,67E-03	0,0011	0,0235			
460	1,7030E-03	2,6071E-03	3,57E-03	0,0010	0,0104			
470	1,5140E-03	2,6489E-03	3,18E-03	0,0005	0,0075			
480	1,5750E-03	2,6935E-03	3,30E-03	0,0006	0,0057			
490	2,3510E-03	2,7909E-03	4,93E-03	0,0021	0,0137			
500	1,3500E-03	2,9333E-03	2,83E-03		0,0107	0,10	0,10	
510	1,2015E-03	2,9870E-03	2,52E-03		0,0000			
520	1,0850E-03	2,9840E-03	2,28E-03		0,0000			
530	1,0234E-03	3,0114E-03	2,15E-03		0,0000			
540	7,0140E-03	2,9716E-03	1,47E-02	0,0117	0,0587			
550	6,7135E-03	2,8337E-03	1,41E-02	0,0112	0,1149			
560	7,7050E-04	2,7679E-03	1,62E-03		0,0562			
570	4,3750E-04	2,9089E-03	9,18E-04		0,0000			
580	1,8630E-03	3,2978E-03	3,91E-03	0,0006	0,0030			
590	2,0525E-03	3,8842E-03	4,30E-03	0,0004	0,0052			
600	1,2880E-03	4,4393E-03	2,70E-03		0,0021	0,24	0,18	
610	4,8680E-03	4,7418E-03	1,02E-02	0,0055	0,0273			
620	4,0470E-03	4,8456E-03	8,49E-03	0,0036	0,0456			
630	1,9860E-03	4,8894E-03	4,17E-03		0,0182			
640	7,3310E-04	4,9628E-03	1,54E-03		0,0000			
650	5,4220E-04	5,0602E-03	1,14E-03		0,0000			
660	5,7470E-04	5,0935E-03	1,21E-03		0,0000			
670	4,0010E-04	5,0010E-03	8,39E-04		0,0000			
680	3,2340E-04	4,9344E-03	6,78E-04		0,0000			
690	3,7750E-04	5,1490E-03	7,92E-04		0,0000			
700	3,3750E-04	5,6298E-03	7,08E-04		0,0000	0,09	0,01	<b>0,29</b>



