UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA

**ANÁLISIS DE LAS EXIGENCIAS
NORMATIVAS DE ILUMINANCIA EN
FUNCIÓN DE LA EDAD**

TESIS DOCTORAL
DAVID GÓMEZ GÓMEZ
ARQUITECTO

2020

**DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍAS ARQUITECTÓNICAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE MADRID**

ANÁLISIS DE LAS EXIGENCIAS NORMATIVAS DE ILUMINANCIA EN FUNCIÓN DE LA EDAD

**DAVID GÓMEZ GÓMEZ
ARQUITECTO**

**DIRECTOR: DR. ESTEBAN DOMÍNGUEZ GONZÁLEZ-SECO
DR. INGENIERO INDUSTRIAL**

2020

Tribunal nombrado por el Sr. Rector Magfco. de la Universidad Politécnica de Madrid:

Presidente: Consolación Ana Acha Román.

Profesora Titular de Universidad Interina. E.T.S de Arquitectura.
Universidad Politécnica de Madrid.

Secretario: Enrique Larrumbide Gómez-Rubiera.

Profesor Asociado. E.T.S. de Arquitectura.
Universidad Politécnica de Madrid.

Vocales: Jaime Navarro Casas.

Catedrático de Universidad. E.T.S. de Arquitectura.
Universidad de Sevilla.

Helena Coch Roura

Profesora Titular de Universidad. E.T.S. de Arquitectura de Barcelona.
Universidad Politécnica de Cataluña.

María Reyes Vigil Montaña.

Profesora Titular de Universidad. Escuela Superior Politécnica.
Universidad Europea de Madrid.

Suplentes: Maria Eugenia Maciá Torregrosa.

Profesora Doctora de Universidad Privada. Escuela Politécnica Superior.
Universidad San Pablo CEU.

Daniel Vázquez Moliní.

Catedrático de Escuela Universitaria. Facultad de Óptica y Optometría.
Universidad Complutense de Madrid.

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día de junio de 2020
en la E.T.S. de Arquitectura de Madrid.

Calificación

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

AGRADECIMIENTOS

Tan sólo dedicar un instante a expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas sin las cuales esta Tesis no habría visto la luz:

Manifestar mi gratitud al Dr. Esteban Domínguez, director de esta investigación, compañero y amigo; por la orientación recibida y por su paciencia; así como a la Dra. Raquel Puente, que me abrió las puertas al mundo de la iluminación y que, durante todos estos años ha sido, y continúa siendo, un referente para mí.

Hacer extensivo este agradecimiento a mis compañeros de la Universidad Politécnica, que con sus palabras de ánimo me han alentado a continuar con la investigación en todo momento; de manera específica a Eva y Conchi, sin cuya ayuda no estaría presentando hoy este documento. Muy especialmente a Chelo, Enrique y César, por su apoyo incondicional y por un tiempo, gratuitamente dedicado a mi trabajo, que no sabré como compensar. Deseo también expresar mi reconocimiento a los compañeros de la UNAM, por su implicación desinteresada en esta investigación; y muy particularmente, a la Dra. Cecilia Guadarrama, que durante mi estancia en México me hizo sentir como un miembro más de su familia.

Quede reservado el más emotivo de mis agradecimientos a mi familia: A mi mujer, Victoria, y a mis hijas, Paula y Claudia; por su comprensión en todo momento y su aliento constante; y porque gran parte del tiempo dedicado a esta investigación se lo he robado a ellas y será difícilmente recuperable. Agradecer finalmente a mis padres el apoyo, en ocasiones silencioso y en ocasiones patente, que he recibido durante todo este tiempo; porque sin su ayuda este trabajo probablemente no habría llegado hoy a su fin.

A todos ellos, muchas gracias.

ÍNDICE

Resumen	5
Abstract.....	7
Capítulo 1. Objetivos, hipótesis y necesidad de la investigación	9
1.1.- Introducción	11
1.2.- Justificación de la investigación.....	12
1.2.1.- Aspectos demográficos de la función de sensibilidad	12
1.2.2.- El tratamiento de la edad en las normativas de iluminación.....	18
1.3.- Hipótesis	21
1.4.- Objetivos	22
1.5.- Propuesta metodológica	24
Capítulo 2. Antecedentes históricos del actual sistema fotométrico.....	27
2.1.- Evolución de los modelos físicos durante el siglo XIX (1800-1860)	29
2.2.- La concepción energética de la luz (1860-1883).....	39
2.3.- Primeras referencias a la sensibilidad espectral (1883-1900)	50
2.4.- Primeras expresiones de la eficiencia luminosa (1900-1912)	60

Capítulo 3. Estado del arte	65
3.1.- Aportaciones desde el campo de la física	68
3.1.1.- Principales estudios considerados por Gibson y Tyndall	68
3.1.2.- Propuestas de función de sensibilidad espectral alternativas	75
3.2.- Aportaciones procedentes del campo de la óptica fisiológica	82
3.2.1- Estudios de carácter óptico	82
3.2.2.- Estudios de carácter fisiológico	87
3.3.- Aportaciones desde el campo de la psicología de la percepción	92
3.4.- Consideración de la edad en las normativas de iluminación	94
3.4.1- La normativa en el ámbito europeo	96
3.4.2- La normativa en el ámbito americano.....	102
 Capítulo 4.- Metodología empleada en la investigación	107
4.1.- Alcance del estudio crítico sobre los fundamentos de la fotometría.....	110
4.2.- Pre-valoración de la calidad de la iluminancia y la calidad óptimas	111
4.3.- Metodología de la toma da datos.....	117
4.3.1.- Pruebas realizadas durante la toma de datos	117
4.3.2.- Características y tamaño de la muestra	125
4.3.3.- Espacio de trabajo de la toma de datos	129
4.3.4.- Material empleado durante la toma de datos	131
4.3.5.- Parámetros controlados en la toma de datos	134
4.3.6.- Otros aspectos relativos al observador considerados	136

Capítulo 5. Análisis crítico de la función de sensibilidad espectral.....	139
5.1.- Análisis de los métodos empleados para elaborar la función.....	141
5.2.- Análisis documental de los fundamentos teóricos de la función.....	151
Capítulo 6. Valoración de la interacción entre la radiación y los medios oculares	161
6.1.- Caracterización de las fuentes luminosas consideradas	165
6.2.- Determinación del flujo luminoso de las fuentes tipificadas	167
6.3.- Determinación de los efectos visuales de las fuentes	172
6.3.1.- Aspectos cuantitativos	172
a. Variación del estímulo debida a la transmitancia espectral	174
b. Variación del estímulo debida a la apertura pupilar.....	178
6.3.2.- Aspectos cualitativos	183
a. Transmitancia global y difusa de los medios oculares.....	183
b. Incremento de la borrosidad y reducción del contraste	189
Capítulo 7. Desarrollo de la toma de datos y análisis de los resultados obtenidos ...	193
7.1.- Desarrollo de la toma de datos	197
7.2.- Estructura de la toma de datos	201
7.3.- Análisis de los datos obtenidos.....	203
7.3.1.- Datos de la serie 1. Variación del nivel de iluminación.....	203
a. Resultados obtenidos para el colectivo de 20 a 29 años.....	204
b. Resultados obtenidos para el colectivo de 30 a 39 años.....	207
c. Resultados obtenidos para el colectivo de 40 a 49 años.....	210
d. Resultados obtenidos para los colectivos de 50 a 69 años	213
7.3.2.- Datos de la serie 2. Variación de la temperatura de color.....	218

Capítulo 8. Conclusiones	225
8.1.- Conclusiones en relación al actual sistema fotométrico	227
8.2.- Conclusiones en relación a las recomendaciones normativas	230
8.3.- Propuesta de modificaciones a incluir en el texto normativo	232
8.4.- Futuras líneas de investigación	235
 Bibliografía.....	 237

Anexo I. Índice de tablas, figuras, ecuaciones y gráficas.

Acrónimos empleados en el texto:

AENOR	Agencia Española de Normalización
ANSI	American National Standards Institute
CEN	Comité Européen de Normalisation
CIBSE	Chartered Institution of Building Services Engineers
CIE	Commission Internationale de L'eclairage.
CTE	Código Técnico de la Edificación
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN-UNE	Europea Norm-Una Norma Española
EPB	Energy Performance of Buildings
IES	Illumination Engineering Society
IESNA	Illumination Engineering Society of North America
LEM	Lighting Energy Management
LM	Lighting Measurement Testing
SUA	Seguridad en la Utilización y Accesibilidad
SLL	Society of Light and Lighting
TCC	Temperatura de color correlacionada
UGR	Unified Glare Rating

RESUMEN

El sistema fotométrico descansa sobre la función de visibilidad relativa propuesta por la Commission Internationale de L'éclairage en 1924. La función fue planteada por Gibson y Tyndall, y se sustenta sobre un conjunto de investigaciones publicadas entre 1912 y 1923. Estos trabajos estiman la visibilidad de las diferentes longitudes de onda mediante dos técnicas: la identificación directa de brillo y la fotometría de parpadeo.

El análisis en profundidad de los métodos empleados permite proponer ciertas limitaciones a las actuales recomendaciones de iluminación para las tareas asociadas al uso oficina. De forma específica, las actuales normativas de iluminación no recogen la incidencia de la edad de los usuarios en los procesos visuales.

Esta investigación tiene como objeto establecer una serie de medidas que permitan optimizar la eficiencia de los sistemas de iluminación diseñados para este ámbito. Tras discutir los fundamentos sobre los que se sustenta la función de sensibilidad espectral se cuantifican los incrementos de nivel de iluminación que son necesarios para equiparar las condiciones perceptivas de los diferentes grupos de edad. Asimismo, se analiza la forma en la que la calidad cromática de las fuentes afecta a estos procesos. El estudio se completa con una toma de datos que refuerza la propuesta desde otra perspectiva.

ABSTRACT

The photometric system is based on the “visibility efficiency function” proposed by the *Commission Internationale de L’éclairage* in 1924. The function itself was developed by Gibson and Tyndall taking into consideration some investigations published between 1912 and 1923. These Works estimate radiation’s visibility of different wavelenghts using two technics: Direct match brightness and flicker photometry.

Analisis of these methods lead us to stablsh some limititations to the current regulations on offices illumination, as they don’t do any reference to the observer age and its incidence in the visual function.

The present research tries to stablsh some recommendations to improve the efficiency of illumination systems. After the discussion on the basis of the spectral sensitivity a correction of the recommendations is suggested in order to match the visual process at different ages. A data acquisition to reinforce the recomendations has been done.

CAPÍTULO 1.

OBJETIVOS, HIPÓTESIS Y NECESIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO 1. OBJETIVOS, HIPÓTESIS Y NECESIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

El auge experimentado por la industria de la iluminación durante la segunda mitad del siglo XIX hizo indispensable una redefinición del sistema fotométrico sobre la que asentar nuevas exigencias y criterios de calidad. El cometido resultó más complejo de lo esperado y, finalmente, en 1924 la Commission Internationale de Léclairage (CIE) se vio obligada establecer las bases del nuevo sistema de forma un tanto prematura (CIE, 1924).

Conscientes de las limitaciones de su propuesta, los miembros del comité tuvieron la precaución de puntualizar que se trataba de datos provisionales y que deberían ser modificados al avanzar en los estudios sobre los procesos visuales. Sin embargo, los datos utilizados en la actualidad (CIE, 2019) mantienen los valores iniciales, limitándose a completarlos por interpolación y extrapolación.

El estudio de los documentos legados por los autores de la propuesta original permite ahondar en las limitaciones del sistema fotométrico y detectar algunas variables que, consecuentemente, no son tomadas en consideración al realizar

mediciones fotométricas o redactar los textos normativos. Más específicamente, la reflexión en torno al proceso de elaboración de la curva permite vislumbrar una posible falta de capacidad de la misma en relación a la caracterización de los procesos visuales en colectivos de edad media.

1.2 Justificación de la investigación

1.2.1 Aspectos demográficos de la función de sensibilidad

Las mediciones fotométricas se articulan en torno a dos elementos: En primer lugar, una magnitud física, la *intensidad radiante*, sobre la cual está estructurada la radiometría; y, en segundo lugar, la *función de sensibilidad espectral*, definida por la Commission Internationale d'Éclairage (CIE) en 1924, que permite valorar los efectos de esta conforme al comportamiento del sistema visual humano. La intensidad radiante, ponderada mediante la función de sensibilidad espectral, da lugar al concepto de intensidad luminosa. Las demás magnitudes relacionadas con el proceso visual (*flujo luminoso, iluminancia, luminancia, ...*) se derivan de las correspondientes magnitudes radiométricas por aplicación de esa misma función. Los datos utilizados para la elaboración de esta función son el resultado de un complejo proceso conceptual que se intensificó de forma significativa a lo largo del siglo XIX y en el cual, además de los fundamentos físicos, intervienen factores de diversa índole (psicológicos, sociales, ...).

Los dispositivos de medición utilizados para visión fotópica han de estar calibrados conforme a la curva de sensibilidad. Sin embargo, dado que se trata de un valor medio obtenido de una muestra de observadores muy reducida, esta función presenta ciertas limitaciones. Estos valores pueden manifestar desviaciones significativas para determinados individuos y colectivos;

desviaciones que, como se ha indicado, no son tomadas en consideración al realizar las mediciones fotométricas.

El presente estudio, que pretende dé lugar a una línea de investigación más amplia, se ha centrado en la determinación de las desviaciones, no recogidas por la fotometría, que presentan los procesos visuales en colectivos de edad media. No obstante, dado el elevado número de factores que intervienen en estos procesos, ha sido necesario fijar el estado de múltiples variables antes de proceder al análisis.

La Commission internationale de l'Éclairage recommande, pour l'usage général, les valeurs suivantes, comme valeurs provisoires pour le facteur de visibilité.

Longueur d'onde (mμ)	Facteur de Visibilité relative(mμ)	Longueur d'onde	Facteur de Visibilité relative	Longueur d'onde (mμ)	Facteur de Visibilité relative
400	0.0004	530	0.862	650	0.107
10	0012	40	954	60	061
20	0040	550	995	70	032
30	0116	60	995	80	017
40	023	70	952	90	0082
450	038	80	870	700	0041
60	060	90	757	10	0021
70	091	600	631	20	00105
80	139	10	503	30	00052
90	208	20	381	40	00025
500	323	30	265	750	00012
10	503	40	175	60	00006
20	710				

Figura 1. Tabla original de valores de visibilidad relativa. (CIE, 1924).

Como se ha indicado, los valores medios de la función de sensibilidad espectral fueron propuestos, de forma temporal, por la Commission Internationale d'Éclairage tras la segunda sesión del sexto meeting llevado a cabo en 1924 (figura 01). Esta propuesta, a su vez, se basaba en los estudios publicados por Gibson y Tyndall un año antes bajo el título Visibility of radiant Energy (Gibson, K. S., & Tyndall, E. P. T. 1923). Existen diversas propuestas

posteriores que merecen ser valoradas, sin embargo, en la actualidad, la utilización de otras funciones de sensibilidad se restringe al ámbito de la investigación, en tanto las mediciones fotométricas prácticas en régimen de visión fotópico se realizan conforme a la función de sensibilidad original.

Para llevar a cabo esta propuesta, los autores determinaron la función de visibilidad mediante el análisis de la capacidad visual de 52 observadores (tablas 1 y 2). Sin embargo, la distribución poblacional de su toma de datos no se corresponde con la del actual colectivo de trabajadores del ámbito administrativo. Así, por ejemplo, únicamente tres de los cincuenta y dos observadores que participaron en el experimento tenían más de 44 años. Es necesario puntualizar que Gibson y Tyndall contaban con datos procedentes de numerosas investigaciones anteriores¹, si bien existen variaciones metodológicas significativas que dificultan la comparación directa de los valores presentados en las mismas.

Tabla 1. Distribución poblacional de la toma de datos llevada a cabo por Gibson y Tyndall.

<i>Rango de edad</i>	<i>Número de observadores</i>
[21-25]	5 observadores
[26-30]	15 observadores
[31-35]	17 observadores
[36-40]	5 observadores
[41-45]	7 observadores
[46-50]	1 observador
[51-55]	2 observadores
[56-60]	-
[61-65]	-
[66-70]	-
Total	52 observadores

¹ Los estudios considerados por Gibson y Tyndall para la elaboración de su propuesta están documentados en el estado del arte.

Capítulo 1. Objetivos, hipótesis y necesidad de la investigación

Tabla 2.- Datos de los observadores que participaron en la investigación de Gibson y Tyndall.

Observador 5 M.C.M. 21 años-Varón	Observador 45 G.E.C. 21 años-Varón	Observador 29 F.H.E. 22 años - Varón	Observador 40 J.F.E. 22 años-Varón	Observador 25 R.M.C. 25 años-Mujer	Observador 11 A.H.B. 26 años-Varón
Observador 28 H.B.W. 26 años-Mujer	Observador 43 A.E.O.M. 26 años-Varón	Observador 9 C.L.C. 27 años-Varón	Observador 12 A.F.E. 27 años-Varón	Observador 21 M.D.S. 27 años-Varón	Observador 27 B.S.W. 27 años-Varón
Observador 49 J.G.T. 27 años-Varón	Observador 22 U.M.S. 28 años-Varón	Observador 26 C.G.S. 28 años-Mujer	Observador 31 F.J.S.S. 28 años-Mujer	Observador 38 F.L.M. 28 años-Varón	Observador 1 E.P.T.T. 29 años-Varón
Observador 4 H.J.M. 29 años-Varón	Observador 39 W.F.A. 29 años-Varón	Observador 2 K.S.G. 31 años-Varón	Observador 6 G.E.M. 31 años-Varón	Observador 8 C.O.F. 31 años-Varón	Observador 18 W.H.H. 31 años-Varón
Observador 20 C.F.S. 31 años-Varón	Observador 10 P.V.W. 32 años-Varón	Observador 50 F.B.S. 32 años-Varón	Observador 7 F.P.P. 33 años-Varón	Observador 19 W.F.M. 33 años-Varón	Observador 36 A.F.B. 33 años-Varón
Observador 37 B.E.J. 33 años-Mujer	Observador 46 I.C.G. 33 años-Varón	Observador 15 C.G.P. 34 años-Varón	Observador 16 C.C.K. 34 años-Varón	Observador 52 R.D. 34 años-Varón	Observador 17 M.K.F. 35 años-Mujer
Observador 48 J.H.D. 35 años-Varón	Observador 3 I.G.P. 36 años-Varón	Observador 35 A.H.T. 36 años-Varón	Observador 24 M.M. 38 años-Mujer	Observador 44 B.M. 39 años-Varón	Observador 47 E.C.C. 40 años-Varón
Observador 13 R.F.J. 41 años-Varón	Observador 23 J.F.S. 41 años-Varón	Observador 32 W.E.F. 41 años-Varón	Observador 34 A.G.W. 41 años-Varón	Observador 30 W.E.M. 42 años-Varón	Observador 33 E.P.H. 43 años-Varón
Observador 14 A.Q.T. 44 años-Varón	Observador 42 F.E.C. 46 años-Varón	Observador 41 C.A.S. 51 años-Varón	Observador 51 P.H.W. 54 años-Varón	-	-

Resulta conveniente hacer notar que los datos que se recogieron para estos tres observadores (los de edad superior) apuntan a una mayor dispersión de los resultados dentro de este colectivo (tabla 3). Así, por ejemplo, los valores de máxima sensibilidad espectral corresponden a una longitud de onda de entre 550 y 560 nm en 47 de los 52 observadores; en tanto los tres observadores mencionados presentan sensibilidades máximas a 540 nm (el observador de 54 años) y 570 nm (los observadores de 46 y 51 años).

Capítulo 1. Objetivos, hipótesis y necesidad de la investigación

Tabla 3.- Valores de visibilidad relativa obtenidos por Gibson y Tyndall (región central).

Edad	$\lambda=530$	$\lambda=540$	$\lambda=550$	$\lambda=560$	$\lambda=570$
21	0,90800	0,97200	0,99000	0,99900	0,95300
21	0,92000	0,98700	0,99900	0,98200	0,87200
22	0,76100	0,85200	0,92400	0,98400	0,99300
22	0,82700	0,94400	0,99900	0,98400	0,94000
25	0,81700	0,93400	0,99900	0,99100	0,98300
26	0,92500	0,98900	0,99800	0,97000	0,89200
26	0,81800	0,92600	0,98600	0,99600	0,94200
26	0,90600	0,98100	1,00000	0,97000	0,91100
27	0,94200	0,99300	0,99800	0,96100	0,88100
27	0,86700	0,95700	0,99800	0,99200	0,95300
27	0,91000	0,98600	0,99800	0,96900	0,90400
27	0,95800	0,99800	0,98600	0,94800	0,89200
27	0,93100	0,99000	1,00000	0,98700	0,93600
28	0,85800	0,95000	0,99800	0,99700	0,98400
28	0,88000	0,95000	0,97800	0,99900	0,98800
28	0,81100	0,91400	0,96600	0,98600	1,00000
28	0,88400	0,97200	1,00000	0,99200	0,97000
29	0,87300	0,95200	0,97300	0,99800	0,99400
29	0,85400	0,94600	0,99600	0,99200	0,95400
29	0,78600	0,90700	0,97800	1,00000	0,96600
31	0,86800	0,95900	0,99700	0,99200	0,96600
31	0,89300	0,97100	0,99900	0,98400	0,93000
31	0,84400	0,94500	0,99600	0,98400	0,92800
31	0,91900	0,99000	0,99200	0,93400	0,86600
31	0,87000	0,96400	1,00000	0,97400	0,90000
32	0,94900	0,99900	0,99800	0,99500	0,99400
32	0,92000	0,99200	0,99800	1,00000	0,98600
33	0,92400	0,98800	0,99800	0,96000	0,86400
33	0,79700	0,92600	0,99600	0,99400	0,97000
33	0,87700	0,95300	0,99200	0,99700	0,95200
33	0,89200	0,95200	0,98600	0,99900	0,96500
33	0,85100	0,93900	0,99100	0,99800	0,95500
34	0,96100	0,99900	0,97800	0,90100	0,79400
34	0,84000	0,95000	0,99900	0,96000	0,87200
34	0,79900	0,92400	0,99000	0,99200	0,92900
35	0,81200	0,93800	0,99800	0,99200	0,97800
35	0,81400	0,90600	0,96500	0,99700	0,98300
36	0,83200	0,94400	0,99900	0,96100	0,88800
38	0,85600	0,97200	0,99800	0,96400	0,90200
38	0,76900	0,88000	0,95500	0,99600	0,98500
39	0,88400	0,98600	0,99300	0,93900	0,85600
40	0,91000	0,97400	1,00000	0,96800	0,91200
41	0,87400	0,95600	0,99200	0,99800	0,97100
41	0,81800	0,91900	0,97600	1,00000	0,98400
41	0,87100	0,97800	0,99800	0,96200	0,91200
41	0,83400	0,94200	0,99100	0,99700	0,97200
42	0,90000	0,96300	0,98500	1,00000	0,97100
43	0,92900	0,98600	0,99600	0,99800	0,95000
44	0,90100	0,95900	0,98500	1,00000	0,98500
46	0,81000	0,89800	0,93700	0,98200	0,99900
51	0,86000	0,93600	0,97400	0,99400	0,99700
54	0,94400	1,00000	0,98200	0,94500	0,86500

El análisis de la distribución poblacional utilizada en las tomas de datos parece indicar una cierta falta de rigor desde el punto de vista del muestreo estadístico. Sin embargo, es necesario incidir en que el perfil demográfico de los Estados Unidos en el primer cuarto del siglo XX, nada tiene que ver con el perfil demográfico de los países industrializados en la actualidad (figura 2). Así, la esperanza de vida (Arias et al., 2019) para un estadounidense de raza blanca nacido en 1912 era de 53,9 años (37,9 para los ciudadanos de raza negra); valor que se incrementó hasta los 60,4 años en 1922 (51,4 para los ciudadanos de raza negra). Si comparamos estos datos con los actuales encontramos una diferencia de cerca de 20 años, con una esperanza de vida para ciudadanos estadounidenses de raza blanca de 78,9 años (75,3 para los ciudadanos de raza negra). Es conveniente puntualizar que en ninguno de los trabajos referenciados por Gibson y Tyndall se han encontrado referencias a la raza de los observadores; si bien los autores hacen mención a un estudio desarrollado en Japón (So, 1920), indicando que probablemente no existen muchas diferencias entre los valores medios obtenidos para la población japonesa y los obtenidos para la población americana.

Area and year	All races and origins			White			Black ¹		
	Both sexes	Male	Female	Both sexes	Male	Female	Both sexes	Male	Female
United States ³									
1922.....	59.6	58.4	61.0	60.4	59.1	61.9	52.4	51.8	53.0
1921.....	60.8	60.0	61.8	61.8	60.8	62.9	51.5	51.6	51.3
1920.....	54.1	53.6	54.6	54.9	54.4	55.6	45.3	45.5	45.2
Area and year	All races and origins			White			Black ¹		
	Both sexes	Male	Female	Both sexes	Male	Female	Both sexes	Male	Female
United States ³									
2016 ⁴	78.7	76.2	81.1	78.9	76.4	81.3	75.3	72.0	78.3
2015 ⁴	78.7	76.3	81.1	78.9	76.6	81.3	75.5	72.2	78.5
2014 ⁴	78.9	76.5	81.3	79.1	76.7	81.4	75.6	72.5	78.5

Figura 2.- Datos de esperanza de vida en Estados Unidos en 1922 y 2016 (Arias et al., 2019)

Dicho esto, parece justificado el hecho de que en investigaciones desarrolladas entre 1912 y 1923, la distribución poblacional difiera sensiblemente de la que tomaríamos en una investigación desarrollada en la actualidad. Resulta oportuno resaltar el hecho de que la duración de la vida laboral se ha visto incrementada significativamente en estos casi cien años. Sirvan de ilustración las palabras del físico canadiense William Osler² que, en 1905 expresó su convencimiento de que los “*15 años dorados de plenitud laboral*” se desarrollaban entre los 25 y los 40 años; los trabajadores de 40 a 60 años eran “*simplemente no creativos*”; y los de más de 60 años resultaban absolutamente inútiles y “*deberían ser puestos a pastar*”. No es necesario ahondar en el cambio de filosofía a este respecto dado que, en la actualidad, muchos países industrializados están prolongando la edad laboral hasta el rango de los (65-70) años.

1.2.2. El tratamiento de la edad en las normativas de iluminación.

Los documentos normativos que fijan los niveles de iluminación suelen hacer referencia, en su parte general, a múltiples factores que afectan al rendimiento visual. Estos factores pueden ser clasificados en tres grandes grupos: por una parte, los asociados a la tarea (Tamaño, Luminancia, contraste, ...); por otra, los vinculados al sistema de iluminación (Nivel de iluminación, deslumbramiento, ...) y, finalmente, los relacionados con el observador (Salud y edad, adaptación, ...).

² Físico canadiense y profesor de medicina en la Universidad Johns Hopkins. En 1905 fue invitado a Oxford de forma permanente y, antes de su partida, dictó un controvertido discurso en el que disertó en tono distendido sobre la plenitud laboral

Sin embargo, el posterior desarrollo de estos textos suele concretarse en una tabla que relaciona de forma directa los niveles de iluminación con las tareas, minimizando las referencias a las características y condiciones del observador. Teniendo en cuenta, además, que la medición de estos niveles de iluminación está basada en el “observador fotométrico estándar CIE 1924” y que este, a su vez, representa la capacidad visual en una muestra reducida de individuos; podemos deducir que esa relación “a tres bandas” no es real; y que, omitiendo cualquier referencia a las características del observador se establece una relación directa entre las diferentes tareas y sus correspondientes niveles de iluminación.

Esta ambigüedad puede detectarse, por ejemplo, en la normativa de ámbito europeo EN-12464-1:2011 que, en su apartado 4, establece los criterios de diseño de iluminación para tareas de interior. Normativa que, tras definir los parámetros fundamentales que determinan el ambiente luminoso, procede a establecer “otros parámetros ergonómicos visuales que influyen en el rendimiento visual”. Estos parámetros se distribuyen en tres epígrafes que hacen referencia a las propiedades intrínsecas de la tarea, la capacidad oftálmica de la persona y el diseño del ambiente luminoso. Sin embargo, la tabla que determina los niveles de iluminación recomendados establece un valor fijo para cada tarea; y la modificación de estos valores para adaptarlos a otras circunstancias se deja a criterio del proyectista.

En el mismo capítulo, la norma especifica que los requisitos de iluminación en lugares de trabajo en interiores se han establecido para satisfacer las necesidades de confort y rendimiento visual de personas con capacidad visual normal. Sin embargo, la definición de la expresión “capacidad visual normal” no está reflejada en ningún punto. Este término, “capacidad visual” se menciona una vez más en el apartado 4.3.3, que establece las iluminancias en el área de la tarea e indica que estos valores deben incrementarse, entre otros supuestos,

cuando la capacidad visual del observador está por debajo de lo normal; pero una vez más no queda definido lo que se entiende por “capacidad visual normal”.

La normativa de ámbito americano, basada en las recomendaciones del IES, adolece de la misma incoherencia. El escaso tratamiento de la edad del observador contrasta con los comentarios introductorios relativos a su importancia. Así, por ejemplo, en el último párrafo de la introducción a la guía de diseño (IESNA, 2000), se especifica que las condiciones establecidas en esta no han sido desarrolladas en relación a la edad; en tanto apunta que los requerimientos visuales de las personas mayores son significativamente distintos a los de las personas jóvenes:

“Se produce un engrosamiento de la lente amarillenta denominada cristalino que implica una reducción de la cantidad de luz que alcanza la retina, aumenta la dispersión dentro del ojo y se reduce el rango de distancias que pueden ser enfocados de forma correcta (presbicia); asimismo, se produce una disminución del tamaño de la pupila, por lo que también disminuye la cantidad de luz que alcanza la retina”.

Tras estos comentarios se definen 25 tipos de tareas genéricas y se establece, para cada una de ellas, una recomendación que diferencia tres niveles de iluminación en función de la edad. Sin embargo, la estratificación de los colectivos se limita a segregar la población menor de 25 años por una parte y el colectivo mayor de 65 por otra; en tanto continúa estableciendo una exigencia fija para el rango que abarca desde los 25 hasta los 65 años (figura 3).

Category	Recommended Illuminance Targets (lux)			Some Typical Application and Task Characteristics	Visual Performance Description
	Visual Ages of Observers (years) where at least half are				
	<25	25 to 65	>65		
Interior and exterior applications	O	100	200	400	Common, relatively small-scale, more cognitive or fast-performance visual tasks
	P	150	300	600	
	Q	200	400	800	
	R	250	500	1000	Visual performance is typically daily life- and work- related, including much reading and writing of hardcopies and electronic media consecutively and/or simultaneously.
	S	375	750	1500	
	T	500	1000	2000	
	U	750	1500	3000	Small-scale, cognitive visual tasks Visual performance is work- or sports-related, close and distant fine inspection, very small detail, high-speed assessment and reaction.
	V	1000	2000	4000	
	W	1500	3000	6000	

Figura 3.- Extracto de las exigencias genéricas de niveles de iluminación. (DiLaura, 2011).

En base a lo expuesto, parece oportuno analizar si la curva de sensibilidad espectral presenta alteraciones significativas en los diferentes perfiles de edad; y si es representativa de los distintos colectivos. Como se detallará más adelante, el objeto de este estudio no es proponer nuevas curvas de sensibilidad, dado que resultaría incongruente con el rigor requerido a un sistema métrico; sino establecer recomendaciones y niveles de exigencia adicionales en cuanto a la cantidad y calidad de los sistemas de iluminación diferenciados para cada uno de los grupos.

1.3 Hipótesis

Desde que, en 1923, se estableciera la curva de sensibilidad espectral; y junto a ella las unidades fotométricas, se han sucedido los intentos para mejorar, puntualizar o adaptar la misma a diferentes situaciones. Estos intentos, sin

embargo, se han estancado debido, posiblemente, a las propias limitaciones internas del sistema fotométrico.

Esta investigación doctoral se plantea con la idea de que, tras reformular el problema tomando en consideración diferentes perspectivas (óptica, psicología de la percepción, etc.) resulta posible determinar las características cualitativas y establecer una tabla que recoja de los niveles de iluminación exigidos en función de la edad de los usuarios de la instalación proyectada. Consecuentemente, la hipótesis sobre la que se estructura esta investigación es que:

“La eficiencia de los procesos visuales desarrollados en el uso oficina varía para colectivos de diferentes edades dentro del rango de 20 a 70 años. Estas variaciones no son correctamente interpretadas por la actual fotometría; siendo necesaria la aplicación de medidas de corrección y recomendaciones diferentes para cada colectivo; tanto desde el punto de vista cuantitativo, como desde un punto de vista cualitativo”.

1.4 Objetivos

Sobre esta base se proponen dos objetivos fundamentales:

Por una parte *“Evaluar el carácter universal de la función de sensibilidad espectral y determinar posibles incongruencias y limitaciones de la misma en relación a la edad del observador”.*

Y; por otra *“Establecer un conjunto de medidas y recomendaciones que permitan optimizar las condiciones en que se desarrollan las tareas del uso administrativo para adaptar el diseño de las instalaciones a la edad de los usuarios”*.

La consecución de estos dos objetivos responde a múltiples parámetros que interaccionan entre sí, dado que las medidas propuestas deben tomar en consideración las limitaciones del sistema fotométrico. Estas medidas, por tanto, no puede limitarse a establecer exclusivamente niveles de iluminación, sino que deben hacerlo tomando en consideración la calidad cromática de las fuentes a utilizar en cada uno de los casos. Consecuentemente, el segundo objetivo debe desdoblarse para tratar de determinar:

Por una parte, cuáles son los coeficientes de ponderación que es necesario aplicar a los niveles de iluminación para equiparar las condiciones visuales en que los colectivos de diferentes edades desarrollan las tareas características de oficina.

Y, por otra, establecer, en función de la edad, las características cromáticas de las fuentes luminosas que permiten optimizar el desarrollo de las tareas asociadas al uso administrativo.

1.5 Propuesta metodológica

La investigación se ha desarrollado en tres fases que acometen el problema desde tres perspectivas diferentes. En la primera aproximación al problema, de carácter teórico, se analizan los fundamentos sobre los que se asienta el actual sistema fotométrico. Se trata con ello de establecer la idoneidad de la fotometría para representar, de forma coherente, la capacidad visual de los diferentes colectivos de edad que concurren en los espacios dedicados al ámbito administrativo. Se busca con ello poner de manifiesto algunas limitaciones de la función de sensibilidad que son intrínsecas a su naturaleza.

En una segunda fase, y con base en este estudio, se ha procedido a realizar una pre-valoración de las desviaciones que, en función de la edad, se producen al ponderar la energía emitida por distintas tipologías de fuentes mediante la aplicación de una única función de sensibilidad. En esta valoración se analizan los efectos de la calidad y cantidad de la luz emitida por estas fuentes sobre diferentes grupos poblacionales tomando en consideración aportaciones de diversos campos de estudio. Para ello, se ha calculado la relación que se establece entre los espectros de emisión de las fuentes de luz de uso habitual en el ámbito administrativo y la calidad de la imagen retinal generada para cada rango de edad, habida cuenta de que es sobre esta imagen sobre la que se estructura el proceso visual. Los valores así obtenidos se han comparado con los derivados de la aplicación directa de la función de sensibilidad a los espectros de emisión.

Finalmente, se ha realizado una toma de datos para evaluar la capacidad perceptiva asociada a cada uno de los grupos de edad en función de las características del sistema de iluminación; y corroborar, de forma experimental, las limitaciones propuestas tras la valoración anterior. El diseño de esta toma de datos pretende independizar los aspectos perceptivos y atencionales de otras

funciones cognitivas de orden superior. En este sentido, se entiende que estas capacidades (las perceptivas y atencionales) no son elementos de la inteligencia, sino condiciones previas al desarrollo de las funciones propiamente cognitivas (Skékely, 1966).

CAPÍTULO 2.

ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL SISTEMA FOTOMÉTRICO

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL SISTEMA FOTOMÉTRICO

El sistema fotométrico es el resultado de un complejo proceso conceptual que se fue intensificando de forma progresiva según avanzaba el siglo XIX. En el mismo, además de los fundamentos propios de la física intervienen factores de muy diversa índole (psicológicos, sociales, económicos, ...). El estudio en profundidad de este proceso resulta indispensable para comprender los elementos que estructuran el actual sistema de medición de la luz.

2.1. Evolución de los modelos físicos durante el siglo XIX. (1800-1860).

Dejando al margen algunas referencias a la ley de la inversa del cuadrado de la distancia, ya implícitas en el libro publicado por Kepler (Kepler, 1604); los primeros escritos sobre fotometría elaborados con cierto rigor científico se remontan a la segunda mitad del siglo XVII. Entre estos trabajos destacan el volumen *Optical Treatise on the Gradation of Light* (Bouguer, P., 1760), obra póstuma de Pierre Bouguer publicada en 1760; y el editado por Lambert bajo el título *Photometrie* ese mismo año (Lambert, J.H., 1760). Muchos autores

consideran que la vela empleada por Bouguer en sus investigaciones constituyó el primer patrón fotométrico. Resulta conveniente resaltar que estos estudios iniciales respondían, en cierto grado, a exigencias de otras disciplinas, y no están estrictamente orientados a la fotometría aplicada tal y como hoy la concebimos. Así, por ejemplo, las primeras alusiones a la intensidad luminosa aparecen como criterio comparativo para determinar las distancias a los objetos celestes.

En lo referente a la naturaleza de la luz, la teoría corpuscular tal y como había sido defendida por Newton en su tratado de óptica (Newton, 1704) gozó de amplio consenso hasta los albores del S. XIX. Esta aceptación queda reflejada, por ejemplo, en el ensayo publicado por Humphry Davy en 1799, donde el autor manifiesta su profundo convencimiento sobre la naturaleza material de la luz (Davy, H.& Davy, J., 1839):

*“Puesto que la luz no es un efecto del calórico, ni un fluido etéreo que se extiende a través del espacio; y dado que el impulso de un cuerpo material en el órgano visual es necesario para generar la sensación; **se deduce que la luz es una materia singular**, capaz de moverse a través del espacio a la mayor velocidad.”*

Sir Humphry David, On heat, light, and the combinations of light, 1799

Sin embargo, este consenso se tambaleó a principios del siglo XIX. En lo que respecta al conocimiento de la luz, el cambio de siglo quedó marcada por la conferencia *The Bakerian Lecture*, dictada por Thomas Young ante la *Royal Society*, y que supuso una ruptura con la concepción material del fenómeno. En su discurso, Young reclamó el restablecimiento de la teoría ondulatoria bajo una perspectiva diferente a la desarrollada por Huygens cien años antes. Bajo el título *“On the Theory of Light and Colours”* (Young, T. 1802), realizó una sólida defensa del nuevo modelo. La concepción ondulatoria, en la forma planteada por Young,

Capítulo 2. Antecedentes históricos del actual sistema fotométrico.

tuvo una gran acogida en el ámbito científico y fue rápidamente difundida. El extracto presentado a continuación, donde un joven Young manifiesta su certeza en relación a la teoría ondulatoria, contrasta radicalmente con el publicado, tan sólo dos años antes, por Davy.

“Un análisis más profundo de la coloración de las películas finas, tal y como está descrito en el segundo libro del tratado de óptica de Newton, ha transformado la predisposición que tenían anteriormente hacia la teoría ondulatoria del sistema lumínico en una fuerte convicción de su realidad y suficiencia”

Sir Thomas Young, On the theory of light and colours, 1801

En el mismo documento, y tomando como datos de partida los presentados por Newton en sus estudios, Young establece las longitudes de onda y las frecuencias correspondientes a los diferentes colores del espectro visible (figura 4) con una gran aproximación a los valores actuales (Tabla 4):

Colours.	Length of an Undulation in parts of an Inch, in Air.	Number of Undulations in an Inch.	Number of Undulations in a Second.
Extreme -	.0000266	37640	463 millions of millions
Red - -	.0000256	39180	482
Intermediate	.0000246	40720	501
Orange - -	.0000240	41610	512
Intermediate	.0000235	42510	523
Yellow -	.0000227	44000	542
Intermediate	.0000219	45600	561 (= 2 ⁴⁸ nearly)
Green - -	.0000211	47460	584
Intermediate	.0000203	49320	607
Blue - -	.0000196	51110	629
Intermediate	.0000189	52910	652
Indigo - -	.0000185	54070	665
Intermediate	.0000181	55240	680
Violet - -	.0000174	57490	707
Extreme - -	.0000167	59750	735

Figura 4. Relación entre onda y color propuesta por Thomas Young

Tabla 4. Confrontación de los datos presentados por Thomas Young con los actuales.

	Datos presentados por Young		Datos actuales (orientativos)	
	Longitud de onda (nanometros)	Frecuencia (Hertzios)	Longitud de onda (nanometros)	Frecuencia (Hertzios)
Rojo (Extremo)	675,64	4,58E+14	740	4,05E+14
Rojo	650,24	4,77E+14		
Intermedio	624,84	4,95E+14	625	4,80E+14
Naranja	609,6	5,06E+14		
Intermedio	596,9	5,17E+14	590	5,10E+14
Amarillo	576,58	5,35E+14		
Intermedio	556,26	5,55E+14	565	5,30E+14
Verde	535,94	5,77E+14		
Intermedio	515,62	6,00E+14	520	5,80E+14
Azul	497,84	6,22E+14		
Intermedio	480,06	6,44E+14	500	6,00E+14
Índigo	469,9	6,58E+14		
Intermedio	459,74	6,72E+14	450	6,70E+14
Violeta	441,96	6,99E+14	430	7,00E+14
Violeta (extremo)	424,18	7,27E+14	380	7,90E+14

A la par que se debatía sobre la naturaleza de la luz, comenzaba a consolidarse, en un plano paralelo, el concepto de “energía”. Se trataba de una nueva magnitud física que influiría significativamente en el desarrollo de la fotometría. Los primeros indicios de esta magnitud estaban implícitos en los trabajos publicados por Christiaan Huygens. El físico holandés había encontrado una relación entre la masa y el cuadrado de la velocidad (mv^2) que permanecía constante antes y después de un choque perfectamente elástico. En esta relación, bautizada por Leibniz como “vis viva”, descansa la noción de “energía cinética” que, tras haberse completado el desarrollo de la mecánica clásica, permitía abordar bajo una nueva perspectiva el estudio de las interacciones entre los cuerpos.

Sin embargo, la idea de “energía” no quedó restringida al ámbito de la mecánica. Durante el siglo XIX continuó desarrollándose y ampliando su significado para, finalmente, acabar integrando el concepto de luz en términos que afectan a su naturaleza y su métrica. Young no utilizó el vocablo en el ámbito de la iluminación, pero lo empleó profusamente (Young, T., 1807) en la descripción de diversos fenómenos físicos (movimiento, colisiones, rozamiento, deformaciones, electricidad, ...). Resulta especialmente interesante la forma en que lo aplica a los fenómenos acústicos (concebido el sonido como movimiento vibratorio) habida cuenta de que, en el mismo documento, establece una analogía entre el sonido y la luz. Durante las siguientes décadas se constatará la vinculación del concepto de energía a fenómenos de diferente naturaleza; y, como se ha indicado, el significado del término acabará vinculándose al estudio de la luz.

“La atenuación del sonido es una consecuencia natural de su distribución sobre una cantidad de materia cada vez más extensa, puesto que diverge de su centro en cualquier dirección. La velocidad real de las partículas del medio de transmisión parece disminuir en la misma proporción en que se incrementa la distancia al centro; consecuentemente, su energía, que debe ser considerada como una medida la fuerza del sonido, debe variar en función del cuadrado de esta distancia. Así pues, a una distancia de 10 pies de un cuerpo emisor, la velocidad de las partículas del medio resulta ser una décima parte que a una distancia de un pie; y su energía, o la fuerza del sonido sólo una centésima parte”.

Sir Thomas Young, A course of lectures on Natural Philosophy and the Mechannical Arts, 1807, pg. 376.

“suponiendo que la luz de cualquier color está constituida por ondulaciones, de una amplitud dada, o de una frecuencia dada, se sigue que tales ondulaciones deben estar sujetas a aquellos efectos que ya han sido examinados en el caso de las ondas acuáticas y de los pulsos sonoros. Se ha demostrado que dos series de ondas iguales, procedentes de puntos cercanos entre sí, pueden destruir sus efectos en ciertos puntos y redoblarlos en otros; y el golpear de dos sonidos, ha sido explicado mediante una interferencia similar. Ahora nos disponemos a aplicar los mismos principios a la alternancia entre la unión y la extinción de colores”.

Sir Thomas Young, A course of lectures on Natural Philosophy and the Mechannical Arts, 1807, pg. 464.

En el plano tecnológico también se produjeron avances significativos. La pugna por el mercado de la iluminación urbana, que se desarrollaba entre la industria del gas y la industria eléctrica, desembocó en una mayor inversión en la investigación sobre la calidad de las fuentes y su eficiencia energética. En este periodo podemos encontrar abundante literatura relativa a la potencia luminosa de los quemadores, el rendimiento obtenido en la combustión de diferentes gases, la emisión de filamentos incandescentes a diferentes temperaturas, etc.

Esta intensificación desembocó en las patentes de Argand, en relación a la producción de luz por combustión; y de Davy, en relación a la producción de luz por procedimientos eléctricos. Patentes que pusieron en evidencia la insuficiencia de la vela de Bouger como unidad fotométrica: por una parte, la falta de uniformidad en la luz emitida y su dependencia de las condiciones atmosféricas conducían a un estándar poco preciso; y, por otra, su escaso poder de iluminación había sido válido para los manantiales utilizados con anterioridad, pero, aplicado a las nuevas fuentes, de mayor intensidad luminosa, comenzaba

a resultar insuficiente. Las nuevas tecnologías demandaban un nuevo patrón de medida más potente y estable.

Por otra parte, con la expansión de la industria del gas, proliferaron las compañías de abastecimiento para iluminación urbana. La necesidad de estandarizar los suministros y establecer exigencias de calidad cuantificables hizo necesario recurrir a la fotometría; pero, para ello, resultaba preciso normalizar las metodologías de ensayo¹. En estas circunstancias, Christison y Turner realizaron las primeras comparaciones entre los métodos de medición visuales y los de base física (Christison, R., & Turner, E.; 1825). En las conclusiones de su estudio, se desaconseja la utilización de los métodos físicos (específicamente de los termométricos) debido a su escasa sensibilidad frente a bajas intensidades luminosas, y por la imposibilidad de separar con exactitud, con la tecnología disponible en aquel momento, la radiación térmica y la lumínica.

Como se ha indicado, la teoría ondulatoria se propagó rápidamente y, hacia 1830, gozaba de amplia aceptación en el ámbito de la investigación científica. Sin embargo, continuaban surgiendo preguntas en relación a la naturaleza de la luz. El paralelismo encontrado entre esta y otros fenómenos físicos demandaba la definición de nuevos enfoques. Sadi Carnot, por ejemplo, se planteaba las similitudes existentes entre luz y calor, fenómeno que hasta aquel momento se había considerado de naturaleza material (Carnot, N.L.S.; 1832):

¹ Desde los primeros estudios y durante todo el siglo XVIII, habían convivido dos tipos de técnicas bien diferenciados: Por una parte, aquellas basadas en la consideración de que el ojo humano es un dispositivo fotométrico ideal, y que, por tanto, había de desempeñar un papel fundamental en las mediciones fotométricas; por otra, las que planteaban dudas sobre la fiabilidad del sistema visual como instrumento para confrontar el brillo de diferentes fuentes luminosas y pretendían establecer procedimientos físicos para su determinación.

“En la actualidad, la luz está considerada de forma general como el resultado del movimiento vibratorio de un fluido etéreo. La luz produce calor, o al menos acompaña al calor radiante, y se mueve con la misma velocidad que éste. El calor radiante es, por tanto, un movimiento vibratorio. Resultaría ridículo suponer que se trata de una emisión de materia, mientras que la luz que lo acompaña sólo puede ser un movimiento. ¿Podría un movimiento (el calor radiante) producir materia (calórico)?

No. Indudablemente; este sólo podría producir un movimiento. El calor es, por tanto, el resultado de un movimiento. De lo que se deduce fácilmente que podría ser producido por utilización de una fuerza motriz y que, a su vez, podría constituir esa fuerza”.

N.L.S. Carnot, Reflections on the Motive Power of Heat; 1890, pg. 221.

La relación entre luz y calor sugerida por Carnot encontró eco rápidamente en los documentos divulgativos de la época. Tal es el caso de “*A text Book on Chemistry*”, manual de amplia difusión publicado por John Willian Draper (Draper, J.W., 1846), donde podemos encontrar la siguiente reflexión:

“El fenómeno del calor radiante nos conduce mediante pasos imperceptibles hasta el fenómeno de la luz. Al tratar del primero tenemos, en muchos casos, dibujadas ilustraciones del segundo”.

J.W. Draper, A text book on Chemistry; 1846, pg. 75.

Poco después, Marcello Melloni desarrolló un dispositivo que le permitía estudiar la transmisión del calor por radiación (Melloni, M.; 1850). Sus estudios le llevaron a la conclusión de que la radiación luminosa y la calorífica descansaban sobre un mismo principio básico. La termopila diseñada por Melloni

dio lugar a una nueva metodología de trabajo que se utilizó profusamente durante los años siguientes. Asimismo, Julius Robert Mayer propuso la idea de que el trabajo mecánico puede ser transformado en calor y que, por tanto, ambos fenómenos son partícipes de una misma naturaleza (Mayer, J.R.; 1842). El desarrollo de estos trabajos continuó de la mano de James Prescott Joule, que en su trascendente artículo *The mechanical equivalent of heat*, establece la equivalencia entre el trabajo mecánico y el calor (Joule, J.P.; 1850).

Con estos estudios, el término *energía* experimentó una importante evolución y fue redefinido desde una perspectiva más amplia. Los planteamientos de Carnot, Mayer, Melloni y Joule abrían una nueva vía que permitía la evolución del concepto de luz: si el calor radiante es una forma de energía, y la luz es de la misma naturaleza que el calor; cabe la posibilidad de identificar luz con energía y, por tanto, de utilizar una métrica compartida para ambos conceptos. Sin embargo, habrían de pasar casi veinte años para que, desde el campo de la fotometría, Julius Thomsen comenzara a trabajar sobre esta posibilidad.

Al margen de estas consideraciones comenzaron a surgir, primero desde el sector eléctrico y después desde el sector del gas, las primeras propuestas sólidas relativas a nuevas unidades fotométricas. Hacia 1844, Draper apuntó por primera vez la posibilidad de utilizar como patrón fotométrico una muestra de platino llevado a la incandescencia por aplicación de una intensidad de corriente. Sin embargo, su propuesta no tuvo un desarrollo inmediato debido a la dificultad técnica que implicaba el control de la resistividad frente a la variación de temperatura. Posteriormente, encontramos una nueva referencia al patrón de platino incandescente en la publicación realizada por Johann Karl Friedrich Zöllner en 1860, pero el problema de control de la resistividad continuaba sin resolverse (Zöllner, J.K.F.; 1865).

La necesidad de definir un nuevo patrón de iluminación se incrementó con la iluminación urbana por suministro de gas que, hacia 1860, era una realidad en las grandes ciudades de los países industrializados. El incremento en el número de compañías suministradoras (sólo en Londres habían llegado a operar hasta trece empresas de forma simultánea) obligaba a los gestores públicos a establecer sistemas de homologación de los suministros. En este contexto, aparecen las primeras normativas de control de calidad para los sistemas de alumbrado urbano que, entre otros puntos, establecen los correspondientes estándares fotométricos. Estos estándares constituyen el antecedente de la actual unidad de intensidad luminosa.

Sin embargo, frente al patrón de incandescencia sugerido por Draper y Zöllner, el sector del gas prefirió apostar por el uso de quemadores estandarizados; tecnología tampoco exenta de dificultades técnicas, puesto que, incluso en ambientes controlados, las fuentes luminosas basadas en la combustión de gas experimentaban grandes variaciones. Las primeras unidades de medida con aceptación en sus respectivos ámbitos nacionales quedan definidas, de forma casi simultánea, en Francia e Inglaterra:

- En 1860, el Parlamento del Reino Unido publica un documento, bajo la denominación “*Metropolitan Gas Act*”, que tenía por objeto la regulación del control de calidad de los suministros londinenses. En el acta quedó definido uno de los primeros estándares fotométricos con aceptación internacional: la **English Candle (Candlepower)**, basada en la emisión de una vela de composición y dimensiones conocidas.
- Ese mismo año, Dumas y Regnault [...] adoptaron la **bujía Cárcel (Cárcel estándar)** para realizar los test fotométricos del gas utilizado en la iluminación de las calles de París, lo que condujo a la adopción

de este tipo de lámpara como patrón por parte de las compañías de gas francesas.

- Por su parte, la Asociación Alemana de la industria de Gas y Agua no definió un patrón hasta 1868, adoptando como unidad fotométrica la **bujía Vereins** (sustituida en 1884 por la bujía Hefner).

Entre 1850 y 1870 podemos encontrar numerosos patrones basados en distintas tecnologías, tales como la lámpara de aceite (Carcel lamp), diferentes tipos de vela (candlepower, french star candle, Munich stearine candle, vereinskeznar, ...) o los patrones de platino incandescente propuestos desde el sector eléctrico.

2.2. La concepción energética de la luz. (1860-1883).

Retomando los planteamientos de Carnot, Mayer y Joule, referentes a la relación entre calor, luz y energía; surge la figura del químico danés Julius Thomsen, que traslada por primera vez el estudio de la luz al campo de conocimiento de la energía (Thomsen, J.; 1865). En sus investigaciones trató de determinar la relación entre radiación luminosa y radiación global. Para ello, separó la radiación visible y la comparó con la radiación total emitida por diferentes fuentes luminosas. Los valores obtenidos por Thomsen en esta comparación oscilan entre el 1,8 y el 2,1 %, en función de la fuente analizada (tabla 5).

Tabla 5. Relación entre radiación y luz propuesta por J. Thomsen para diversas fuentes.

Fuente analizada	Radiación total	Radiación visible	Candle power	Eficiencia
<i>Spermaceti lamp</i>	14,644	0,307	1	0,021
<i>Ordinary Illuminating gas</i>	16,820	0,310	1,2	0,0184
<i>Ordinary Illuminating gas</i>	106,85	2,255	7,7	0,021
<i>Moderator lamp</i>	-	1,700	6,25	-
<i>Moderator lamp</i>	119,342	2,459	8,6	0,021

La confirmación definitiva de la naturaleza energética de la luz llegó, de la mano de James C. Maxwell, en un plano paralelo al de las investigaciones de Thomsen. El científico escocés trabajaba en un estudio teórico fundamentado en la mecánica clásica con el que pretendía determinar la velocidad de transmisión de la inducción electromagnética (Maxwell, J.C.; 1861). El valor obtenido en este estudio fue de 310.740 km/s; que, para su sorpresa, coincidía de forma casi exacta (con un error inferior al 1%) con el determinado por Armand Hippolyte Fizeau (314.858 km/s) para la velocidad de la luz. Esta coincidencia le llevó a suponer que ambos fenómenos eran de idéntica naturaleza:

La velocidad de las ondulaciones transversales en nuestro medio hipotético, calculada a partir de los experimentos electromagnéticos de los Sres. Kolhrausch y Weber, coincide tan exactamente con la velocidad de la luz calculada a partir de los experimentos ópticos del Sr. Fizeau, que difícilmente podemos evitar la inferencia de que la luz consiste en ondulaciones transversales del mismo medio que es la causa de los fenómenos magnéticos y eléctricos.

J. C. Maxwell, op. cit., part III, p. 22.

En 1864, tras realizar una demostración matemática que le permitió unir las ecuaciones de la transmisión de la luz con las del electromagnetismo publicó un nuevo artículo en el que vuelve a incidir en este hecho (Maxwell, J.C.;1865):

La concordancia de los resultados parece demostrar que la luz, la electricidad y el magnetismo son manifestaciones de la misma sustancia, y que la luz es una perturbación electromagnética que se propaga por el campo siguiendo leyes electromagnéticas.

*J. C. Maxwell, "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field",
en Philosophical Transactions of the Royal Society, cap. VI.*

Mientras tanto, el desarrollo de los patrones fotométricos discurría lejos de consideraciones conceptuales. Hacia 1880, en el sector del gas vuelve a intensificarse el debate. Conscientes de las limitaciones de la bujía Cárcel, la Candlepower y la bujía Vereins, se propusieron nuevos estándares. Es el caso del "Methven Standard Screen" (1878), defendido por la Asociación Británica de Gestores del Gas; del "Giroud Standard" (1882) presentado en Francia por Giraud; o de la Hefnerkerze (1884) alemana. Patrones que seguían siendo rechazados desde el ámbito eléctrico, reforzado tras la presentación de las patentes de Joseph W. Swan y Thomas A. Edison. Desde este sector se argumentaba que una llama difícilmente podía satisfacer las condiciones de constancia exigibles a un patrón de iluminación; como resultado de su sensibilidad a muy diversos factores (el volumen de combustible del depósito, la composición del combustible, la temperatura de la combustión, la transparencia y el grosor de la llama, ...). Consecuentemente, se insiste en la adopción de patrones basados en la incandescencia del platino. Schenwdler (1878) retomó las propuestas de Draper y Zollner y continuó con el desarrollo teórico del "Platinum Standard"; pero hubo que esperar hasta 1883 para que las

investigaciones de Violle desembocasen en el patrón adoptado por la International Commssion on Electrical Units.

Durante el último cuarto del siglo, el sector de la iluminación eléctrica recibió nuevos impulsos gracias a las demostraciones prácticas llevadas a cabo por Jablochhoff y Brush en relación al alumbrado urbano; y las ya mencionadas patentes de Swan y Edison en el ámbito del alumbrado doméstico. Comenzaba a perfilarse la posibilidad de comercializar de forma competitiva la iluminación eléctrica, que había quedado temporalmente relegada al campo de la teoría y la investigación.

En 1881 tuvo lugar el *International Congress of Electricians*, cuya agenda incluía la definición de un sistema universal de unidades eléctricas. El evento, presidido por Jean Baptiste Dumas, congregó a 250 delegados de 28 países entre los que se encontraban grandes autoridades científicas de la época: William Thomson (Lord Kelvin), Jean-Baptiste Dumas, Tyndall, Crookes, Helmholtz, Kirchhoff, Siemens, Rayleigh, ... Durante el desarrollo de la convención Jules Louis Gabriel Violle propuso la utilización de un nuevo patrón fotométrico que captó la atención de diferentes personalidades científicas del ámbito (incluido el propio Dumas). Se trataba de un estándar absoluto basado en la luz emitida por 1 cm² de platino elevado a su temperatura de fusión y en proceso de solidificación. Este sistema gozaba de ciertas ventajas frente a otros planteamientos anteriores, dado que podía ser reproducido con exactitud en condiciones razonables y se mantenía constante a lo largo del tiempo.

En las conclusiones del congreso se definió una gran parte del sistema “cgs” y se establecieron las unidades prácticas para la resistencia (Ohmio), la intensidad (Amperio), la carga eléctrica (Culombio) y la capacidad (Faradio). Asimismo, se recomendó la constitución de una comisión internacional con el objeto de, entre otras cuestiones, determinar un estándar de iluminación

definitivo. A raíz de esta última recomendación, y a instancias del gobierno francés, el 16 de octubre de 1882 dio comienzo la “*International Conference for the Determination of the Electrical Units*”, a cuya primera sesión asistieron cuarenta y siete representantes de diferentes países. Durante el debate referente al estándar de iluminación se realizaron diferentes propuestas: Wiedemann planteó la utilización de la luz emitida durante la combustión de una gasa saturada de trementina en presencia de oxígeno; Siemens, a su vez, propuso la emisión de una mezcla de metano y oxígeno a una temperatura prefijada; pero Helmholtz resaltó la complejidad de producir esta mezcla en proporción constante y regular la temperatura de combustión simultáneamente. En el transcurso del debate Dumas planteó considerar las investigaciones relativas a la emisión del platino en proceso de solidificación.

Tras presenciar los ensayos realizados por Violle, una parte de la comisión se mostró favorable a la sugerencia de Dumas; sin embargo, Leblanc (responsable de las determinaciones fotométricas de la iluminación por gas de París) insistía en las ventajas de la lámpara carcel. En relación al estándar absoluto de iluminación, la conferencia finalizó con las siguientes conclusiones:

- Se acordó esperar a la finalización de los experimentos relativos a la emisión de luz del platino en solidificación, confiando que condujeran a una estándar de iluminación definitivo.
- Se recomendó el empleo de la lámpara carcel, conforme a las especificaciones adoptadas por Dumas y Regnault, como patrón secundario; y se autorizó también el empleo de lámparas de aceite siempre y cuando existiera control sobre su proceso de fabricación.
- Se llamó la atención sobre la necesidad de analizar las condiciones bajo las cuales se realizaban las comparaciones, incidiendo además

en diferentes aspectos metodológicos no considerados hasta ese momento. Así, por ejemplo, Nichols sugería la utilización de la eficiencia esférica media, utilizada en el sector eléctrico, frente a la eficiencia medida en el plano horizontal, utilizada en el sector del gas (Nichols, E.L.; 1889).

Al año siguiente, la *International Commission on Electrical Units*, celebrada en París en 1883, acordó la adopción definitiva de la propuesta presentada por Violle, publicándose los resultados de las investigaciones al año siguiente (Violle, J., 1884). Esta decisión fue ratificada sucesivamente desde diversos foros y entidades: *International Conference for the Determination of the Electrical Units* (1884), *Conference of Electricians* (París, 1887), *International Congress Chicago*, 1893) e *International Conference of Electricians* (Geneve, 1896). Con la aprobación del patrón Violle parecía avanzarse firmemente hacia la definición de un estándar fotométrico definitivo. Sin embargo, la fragmentación del mercado y la fuerte competencia prolongaron la utilización interesada de las antiguas unidades, motivo por el cual la candle-power y la lámpara carcel continuaron en uso tanto a nivel práctico como en las publicaciones científicas.

Por otra parte, el mismo año de la aprobación del patrón Violle, surgen nuevas críticas a los planteamientos sobre los que se fundamenta la fotometría; y comienzan a aparecer propuestas de otros sistemas de medida basados en un análisis más profundo de los conceptos y magnitudes asociados a los sistemas de iluminación. Preece, por ejemplo, publica una reflexión referente a la naturaleza de este tipo de unidades que abrirá nuevos debates en el campo de la fotometría (Preece, W.H., 1883):

“No deseamos conocer la intensidad de la luz emitida por fuente luminosa, sino la intensidad de iluminación en la superficie del libro que estamos leyendo, o del sobre el papel en el que escribimos, o

de las paredes en las que colgamos nuestros cuadros, o sobre las superficies de las calles y los pavimentos sobre los que circula el denso tráfico de nuestras ciudades”.

*Preece, W.H., On a new standard of illumination and the measurement of light;
1883, pg. 270*

Preece incide, asimismo, en la poca utilidad de los patrones de iluminación propuestos hasta ese momento; argumentado a modo de ejemplo, la imposibilidad de medir satisfactoriamente la luz aportada por un conjunto de lámparas distribuidas en una habitación sobre una superficie. Efectivamente, a pesar de la aparente divergencia de los patrones propuestos hasta el momento, todos ellos se articulan en torno al concepto de intensidad luminosa de la fuente. Frente a ello, Preece plantea la posibilidad de establecer un sistema de medida basado en la superficie iluminada y no en la intensidad del foco emisor. Su propuesta de estándar hace referencia al espacio iluminado por una candela británica estándar a una distancia de 12,7”; equivalente, según el mismo autor, a la iluminación generada por el Carcel francés en la misma superficie a 1 m de distancia.

Este tipo de reflexiones permitirá que, progresivamente, vaya tomando cuerpo el sistema de magnitudes fotométricas tal y como actualmente lo conocemos. Así, por ejemplo, en el *International Electrical Congress* (Chicago, 1894) se sugiere que la unidad práctica de luminotecnia quede definida como la iluminación producida por un Bougie decimal a una distancia de un metro. M. Hospitalier, planteó la posibilidad de utilizar el término bougie-at-a-metre (bujía por metro) o una nueva denominación, tal como lux; término que había sido utilizada por Preece 10 años antes como la iluminación producida por una fuente con una intensidad luminosa 1 carcel a 1 m de distancia. Ese mismo año, la

revista *La lumière Électrique* publica un sistema magnitudes de iluminación más completo elaborado por M. Blondel (Macfarlane, A. 1895):

- **La cantidad de luz (Q);** cuya unidad, el rad, quedaba definida como la cantidad de luz producida por la emisión de 1 lumen durante 1 segundo.
- **Intensidad luminosa (I);** cuya unidad de medida sería el Pyr; definido como la vigésima parte de la intensidad luminosa emitida por el patrón Violle.
- **Flujo luminoso (F);** cuya unidad de medida sería el lumen, definido como el flujo luminoso que es emitido a través de un estereorradián por una fuente esférica que emite luz con una intensidad, homogénea en todas direcciones, de un Pyr. Cabe mencionar que, en la actualidad, el flujo luminoso está referido a la emisión global de la fuente, en tanto la definición sugerida por M. Blondel, corresponde a la emisión a través de la unidad de ángulo sólido. En este sentido, Macfarlane propone la utilización del bougie como la emisión global de la fuente luminosa esférica ($1 \text{ bougie} = 4\pi \text{ lúmenes}$)
- **Iluminación (E);** cuya unidad de medida sería el lux, definido como la iluminación producida por un lumen distribuido perpendicularmente en una superficie de 1 m^2 .
- **Radiación intrínseca (R).** Referida al flujo luminoso emitido por unidad de superficie de la fuente; medida en lúmenes por cm^2 .
- **Cantidad de iluminación (L).** La definición de este concepto planteaba un problema semántico, dado que denominación francesa

illumination era utilizada en inglés para definir el concepto “iluminación”. Por este motivo, M. Hospitalier introdujo el término “lumination” (luminancia). La unidad utilizada, el phot, quedó definido como la cantidad de iluminación producida por un lux en durante un periodo de tiempo de 1 segundo.

- **Brillo intrínseco (E)**; referido a la intensidad luminosa emitida a través de 1 cm² de superficie de la fuente; medido en pyr/cm².

Este sistema fue defendido por Alexander MacFarlane en el *93th Meeting of the American Institute of Electric Engineers*, que tuvo lugar en Nueva York (1895). En el debate que se desarrolló tras su presentación, algunos miembros del comité insistieron en la necesidad de establecer un sistema de unidades que tomara en consideración la sensibilidad del ojo humano:

(...) Es cierto que no disponemos de un sistema de unidades cgs para la métrica de la luz, y que difícilmente podemos aspirar, incluso en un futuro cercano, a tener una unidad de luz basada en el sistema de gramo, el centímetro y el segundo. (...) La luz nunca podrá expresarse en unidades cgs porque se trata meramente de una magnitud fisiológica.

A. MacFarlane, On the units of light and radiation; 1895.

Resulta interesante comparar este listado de magnitudes con otro, bastante más próximo al sistema actual, propuesto por Henry Crew tan sólo tres años después (Crew, H. 1898). En el artículo, el autor vuelve a incidir en la dificultad que supone la medición de los parámetros luminosos en términos mecánicos y en la necesidad de trabajar exclusivamente con la energía en la medida en que esta es capaz de afectar a la retina de un ojo humano normal.

- **Intensidad de una fuente luminosa puntual (J):** Cantidad de energía luminosa emitida por segundo. Para evitar confusiones con otros conceptos físicos, Crew propone la utilización del término “intensidad luminosa”. Dando por sentado la imposibilidad de determinar la intensidad en términos mecánicos sugiere que la unidad quede definida como *“La intensidad de la lámpara Hefner en dirección horizontal, tomando las dimensiones de la lámpara conforme a lo establecido en Berlín”*. La denominación propuesta para esta unidad es la candela (Candle power).:
- **Flujo luminoso (ϕ):** Proporción en la que una fuente puntual emite energía luminosa a través de la unidad de ángulo sólido. La unidad propuesta para la magnitud es el lumen. Cabe puntualizar que, en la actualidad, los conceptos de flujo luminoso e intensidad luminosa están invertidos frente a la propuesta planteada por Crew.
- **Iluminación (E):** Relación entre el flujo luminoso y el área en que este se distribuye. Se trata, por tanto, de una propiedad de la superficie en un punto; y queda determinada exclusivamente por el área y la luz que incide de forma directa sobre ella, independientemente de la fuente que produzca la luz. Cabe destacar que, estando en pleno apogeo el sistema cgs, el lux quedaba definido en términos de lumen por cm^2 .
- **Brillo (B):** Es el flujo luminoso que abandona la unidad de área de superficie aparente. Conforme a las indicaciones de Crew, la diferencia fundamental entre iluminación y brillo es que la primera es considerada como el origen del flujo luminoso; en tanto en la segunda, la superficie es considerada como el receptor del mismo. Bajo este prisma, el estándar Violle es esencialmente un estándar de brillo que se transforma en estándar de intensidad al trabajar con un diafragma de

dimensiones definidas. La unidad de brillo es el lumen por cm^2 ; se trata, por tanto, del brillo desprendido de una superficie que emite un lumen por cm^2 de superficie aparente.

- **Cantidad de luz (-):** Es el producto del flujo luminoso por el tiempo que dura la emisión; medido en lúmenes por segundo.
- **Constante de difusión:** El documento de Crew describe, asimismo, otros conceptos relacionados con el comportamiento de las superficies reflectoras. Es el caso de la constante de difusión, definida como la relación entre el brillo y la iluminación de cualquier punto de una superficie. El valor numérico de la constante representa la fracción de la luz incidente que en un punto que es reflejada de forma difusa a través de la unidad de ángulo sólido.
- **Luminosidad:** En relación al creciente interés por la eficiencia luminosa espectral, Crew realiza una serie de puntualizaciones importantes que le conducen a proponer esta última magnitud. Expone, una vez más, que los parámetros definidos (brillo, iluminación, ...) están referidos a energías luminosas de la misma calidad, en relación a su composición espectral y tonalidad. Plantea que los niveles requeridos para leer; están vinculados a la naturaleza de la emisión; y considera necesario definir un parámetro que permita establecer la equivalencia entre una habitación iluminada con luz azul y otra iluminada con luz roja. La propiedad particular, independiente del color, que determina el valor del iluminante es lo que se denomina luminosidad.

2.3 Primeras referencias a la sensibilidad espectral (1883-1900).

Para algunos autores de la época las “especulaciones” teóricas de Maxwell no tenían importancia desde un punto de vista práctico, dado que únicamente afectaban a la naturaleza física del modelo ondulatorio; pero no a los parámetros matemáticos que determinan las propiedades de las diferentes ondas lumínicas y sus efectos (Palaz, A., 1892):

Finalmente; debe decirse algo en relación al proceso teórico de producción de luz, a pesar de que este proceso no conduce a ningún resultado práctico. Los trabajos teóricos de Maxwell han mostrado que los fenómenos eléctricos son transmitidos por ondulaciones en el medio etéreo; y esas ondulaciones coinciden con las vibraciones luminosas cuando su longitud de onda es suficientemente corta. De acuerdo con esta teoría, la luz podría ser sólo un caso particular de ondulación eléctrica. Los recientes experimentos de Hertz han confirmado experimentalmente este punto de vista.

A. Palaz. Traité de photométrie industrielle, 1892.

Tal y como indica Palaz, la constatación práctica de las teorías de Maxwell había llegado, en 1887, de la mano de Heinrich Rudolph Hertz (Hertz, H.R., 1887). El físico alemán llevó a cabo una serie de experimentos, basados en las teorías de Maxwell, que permitieron al autor producir y detectar radiaciones electromagnéticas en su laboratorio. Durante los dos años siguientes, Hertz continuó con sus trabajos experimentales; determinó la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas y corroboró su coincidencia con la velocidad de transmisión de la luz. Asimismo, estableció que se trataba de ondas transversales sometidas a los fenómenos de reflexión, refracción y polarización.

A pesar de las reticencias planteadas por Palaz y otros autores, la validación de las teorías de Maxwell afectó profundamente al concepto de luz, dejando patente su naturaleza electromagnética y desplazando su estudio, de forma casi definitiva, al campo de la energía. Tras la publicación de las investigaciones de Hertz, se retomó con fuerza la línea de trabajo abierta veintidós años antes por Julius Thomsen. Se iniciaba con ello una etapa de intensa investigación centrada en la búsqueda del equivalente mecánico de la luz: si la luz es una forma de energía se debe medir en las mismas unidades que esta (caloría-gramo, ergio, julio). En este periodo, se desarrollan numerosos estudios que intentan determinar este equivalente mecánico de la luz, así como de determinar la eficiencia energética de las diferentes tecnologías de producción. Con esta idea, tratan de encontrar la relación entre la energía emitida en forma de luz y la energía total invertida en su producción (Total efficiency); valoración que requiere de un análisis intermedio para establecer la proporción entre la radiación total y la radiación emitida en el espectro visible (radiant efficiency). Según nos indica Nichols (Nichols, E.L. 1900), durante este periodo inicial se utilizaron al menos cuatro metodologías de trabajo diferentes para calcular la eficiencia radiante:

- Julius Thomsen separó la radiación térmica de la luminosa mediante la interposición de una lámina de agua de 20 cm de espesor, y procedió a la medición de ambas radiaciones mediante una termopila de naturaleza similar a la desarrollada por Melloni quince años antes (Thomsen, J., 1865). En posteriores investigaciones, el agua de la lámina fue sustituido por otras disoluciones que permitían aislar de forma más precisa las radiaciones correspondientes al espectro visible.
- Blattner, diseñó una segunda metodología, consistente en introducir la fuente luminosa en un calorímetro de cristal. Este dispositivo le

permitía medir el caudal de fluido y el incremento de temperatura y, con los datos obtenidos, calcular la cantidad de calor disipada por la fuente (Blattner, 1886).

- Staub empleó, para estudiar la emisión de los tubos de vacío, una versión modificada del calorímetro bunsen ice, basado en la fusión de un bloque de hielo (Staub, G., 1890).
- El cuarto método, algo más riguroso, respondía a las investigaciones sobre el espectro solar desarrolladas por Langley (Langley, S.P., 1888). El procedimiento consistía en descomponer la emisión de la fuente en sus diferentes longitudes de onda y, tras realizar un análisis de los datos obtenidos, integrar las radiaciones correspondientes a cada una de las regiones.

Como se ha indicado en los párrafos anteriores, el primero en retomar la línea de trabajo abierta por Thomsen fue W. Blattner, que utilizó un calorímetro de cristal que le permitía separar la radiación luminosa del “calor oscuro”. En sus estudios, Blattner trató de establecer la eficiencia luminosa de diferentes tipologías de lámparas incandescentes. Ese mismo año, Merritt y Ryder realizaron un estudio en el que comparaban la metodología de Melloni-Thomsen con la usada por Blattner (Merritt, E., Ryder, S., 1886). Durante los años siguientes el número de estudios se multiplicó: Nakano analizó la eficiencia de las lámparas de arco (Nakano, H. 1889), Staub la de los tubos de vacío (Staub, G., 1890), Marks también centró sus investigaciones en las lámparas de arco (Marks, 1890), Rogers estudió las fuentes de magnesio (Rogers, 1892), Nichols y Crehore trabajaron sobre la luz emitida por los proyectores concentrados (Nichols, E.L., Crehore, 1894); ... La tabla 6 Contiene una enumeración no exhaustiva de los resultados obtenidos en diferentes investigaciones desarrolladas entre 1880 y 1905.

Capítulo 2. Antecedentes históricos del actual sistema fotométrico.

Tabla 6. Relación no exhaustiva de las eficiencias propuestas en diferentes investigaciones.

Artículo	Fuente analizada	Eficiencia Total W(luz)/W	Eficiencia Radiante W(luz)/W	Eficacia Radiante (W/Cp)
Melloni (1850)				
Tyndall (1864)	Platino incandescente Llama de gas Lámpara de arco		4,17% 4% 10%	
Thomsen (1865)	Spermaceti lamp (8,9 grains/h) Ordinary Illuminating gas Ordinary Illuminating gas Moderator lamp Moderator lamp	0,29% 0,1% 0,29% ----- -----	2,1% (1,84)-1,97% (2,1)-1,97% ----- (2,1)-2,6%	0,307 0,258 0,293 0,272 0,286
Langley (1882)	Sunlight Illuminating gas		2,4%	
Blattner (1886)	Lámpara incandescente		5-6%	
Merrit(1886)	Lámpara inc. Edison 16cp-255 Ω Lámpara inc. Edison 16cp-249 Ω Lámpara inc. Weston 16 cp-402 Ω Lámpara inc. Weston 16 cp-152 Ω Lámpara inc. Bernstein 8 cp-11,3 Ω		0,5-6,5% 1,6-7,2% 2,1-4,8% 2,1-6% 0,8-3,8%	0,19-0,59 0,49-1,61 0,3-1,27 0,36-1,06 0,5-1,00
Conroy (1889)	Ordinary Illuminating gas		1,75%	
Nakano (1889)	Lámpara de arco		10,4%	
Preece (1888)	Grasa Cera Spermaceti Aceite mineral Aceite vegetal Gas de hulla Gas de carbón graso Electricidad (Arco) Electricidad (glow)	0,203% 0,268% 0,293% 0,315% 0,442% 0,317% 0,521% 0,458% 8,372%		
Tumlirz y Krug (1888)	Filamento de platino incandescente			0,19
Tumlirz (1889)	Lámpara de acetato de amilo		2,4%	0,212
Staub (1890)	Descarga en tubo Geisler		32%	
Marks (1890)	Lámpara de arco		8-13%	
Rogers (1892)	Magnesio Parafine candle Illuminating gas Illuminating gas (Argand burner)		12,5% 1,53% 12,8% 16,1%	
Nichols&Crehore (1894)	Limelight modificado Limelight original		14% 8,4%	
Nichols (1900)	Acetylene flame Incandescent lamp - Abney&Festing	1,99-2,36%	10,5% 5,15-5,5%	
Nichols (1888) (referenciado a la lámpara de 16cd)	Incandescent lamp 4 candles Incandescent lamp 10 candles Incandescent lamp 16 candles Incandescent lamp 22 candles Incandescent lamp 28 candles		0,211 0,632 1 1,368 1,589	2,53 1,37 1 0,82 0,72
Angstrom (1903)	Lámpara Hefner			0,121
Drysdale y Jolley (1907)	Filamento nernst Arco Luz amarilla-verde monocromática			0,119 0,0805 0,0598

La publicación con más impacto de esta primera etapa corresponde a las investigaciones desarrolladas por Turmlirz (Turmlirz, O., 1889), que utiliza en sus estudios diferentes dispositivos termométricos con los que realiza mediciones de la radiación total y la radiación luminosa emitidas por una lámpara tipo Hefner. Para separar las longitudes de onda de los diferentes sectores del espectro, se sirve del método ideado por Melloni. En sus conclusiones propone una energía de 0,01515 Julios como equivalente mecánico de la luz emitida por la lámpara patrón de acetato de amilo. Sin embargo, todos estos trabajos presentan limitaciones por diversos motivos: La concepción exclusivamente energética de la luz sobre la que se asientan; las discrepancias metodológicas en la forma de medir la intensidad de distintas fuentes; etc.

El análisis conjunto de los datos recabados en estas investigaciones puso de manifiesto incongruencias significativas: así, la eficiencia energética de las fuentes luminosas resultaba bastante homogénea para las fuentes basadas en la incandescencia y en la combustión de gases y líquidos; pero esta uniformidad se perdía al estudiar las fuentes no incandescentes. La reflexión sobre estos aspectos hizo que se tomaran en consideración aportaciones provenientes de otros ámbitos y, con ello, parte de las investigaciones fueron desplazadas al campo de la espectrofotometría, técnica que comenzaba a utilizarse en los estudios referentes a la radiación solar. En torno a 1880, comenzamos a encontrar estudios relativos a la distribución espectral de la luz emitida por diferentes las fuentes luminosas. Tal es el caso de Crova, que por medio de un dispositivo polarizador comparó diferentes fuentes con una lámpara moderadora estandarizada (Crova, M.L. 1878); Pickering, que utilizando como patrón una llama de gas, trató de establecer la intensidad relativa de los colores componentes de varios modelos de lámparas desde un punto de vista espectrofotométrico (Pickering, W.H. 1880); o Schumann, que desarrolló un amplio estudio de la emisión espectral de la lámpara incandescente. Años después Nichols y Franklin (Nichols, E. L., Franklin, W.S. 1889) llevaron a cabo

un análisis comparativo de los diagramas de emisión de diferentes fuentes (velas, lámparas de petróleo y de gas, lámparas incandescentes, ...).

La reflexión sobre los resultados obtenidos en estas investigaciones hizo volver las miradas hacia el campo de la psicología de la percepción y; de forma progresiva, fue tomando forma el concepto de sensibilidad espectral. En 1887, Ebert hace mención a los valores del estímulo umbral para las diferentes regiones del espectro visible y, en las conclusiones de su estudio indica que la sensibilidad a la excitación lumínica es máxima para las longitudes de onda correspondientes a la luz verde, y mínima para las correspondientes a la roja (Ebert, H., 1887). En esa misma década el Allegheny Observatory, institución dedicada a los estudios astronómicos, organizó una expedición al monte Whitney con el objetivo, entre otros, de determinar la cantidad de energía radiante procedente del sol que alcanza la atmósfera terrestre en comparación con la que alcanza la superficie de la Tierra. Para ello se realizaron mediciones espectrofotométricas simultáneas a diferentes cotas. El análisis de los datos recabados en esa expedición condujo años después (Langley, S.P., 1888) a establecer que una determinada cantidad de movimiento vibratorio en la región verde del espectro genera una impresión 100.000 superior a la producida por la misma cantidad de movimiento vibratorio en la región del rojo oscuro (750 nm):

Hay un fallo en el trabajo de algunos físicos, al no considerar cuan distintos pueden ser los efectos ópticos, producidos por la misma cantidad de energía, en función de la longitud de onda en que está es emitida. No existe, en ningún trabajo que conozca, una cuantificación exacta o aproximada de los efectos oculares relativos de una cantidad específica de energía en diferentes partes del espectro.

S.P. Langley, Energy and vision; 1888.

Para la obtención de sus datos Langley diseñó un aparato que le permitía determinar el efecto visual relativo de las diferentes longitudes de onda. La metodología empleada por el físico se basaba en el umbral de visibilidad que permitía la lectura de una tabla de logaritmos. Los datos obtenidos mostraban claramente la existencia de un máximo de sensibilidad en la región de longitud de onda media del espectro que se desplazaba en función de los niveles de iluminación empleados. Conviene, no obstante, destacar la existencia de un estudio anterior, (Vierordt, C. 1869), que permitía establecer una primera aproximación a lo que hoy conocemos como curva de sensibilidad espectral.

Hacia 1880 un discípulo avanzado de Helmholtz, Arthut König, desarrolló una serie de investigaciones, más extensas y minuciosas, que daban continuidad a los trabajos de Langley (König, A. & Dieterici, C. 1892). En sus estudios de óptica fisiológica comparó las sensaciones de brillo que las dos mitades de un campo fotométrico producían en una serie de observadores; determinando, de esta forma, el brillo relativo generado por varias longitudes de onda en relación a una longitud de referencia específica. König repitió la toma de datos para nueve niveles de iluminación distintos que oscilaban entre 6 y 260.000 veces el umbral de visión, obteniendo como resultados una serie de curvas que se aproximan a las actuales funciones aprobadas por la CIE para los niveles de iluminación fotópica y escotópica (figura 5), así como a las características de la distribución de sensibilidad de la visión mesópica. Si bien los resultados obtenidos por König y los de Langley presentaban algunas diferencias, resultan bastante parecidos en su forma general y muestran claramente la relación entre la longitud de onda y la sensación de brillo.

Figura 5. Propuestas de brillo relativo de A. König y C. Dieterici para observadores tricromáticos normales con diferentes niveles de iluminación (La curva A corresponde al nivel superior).

Encontramos otro referente interesante en las investigaciones desarrolladas por Edward L. Nichols, quien continuaba con sus estudios relativos a la energía y la luz emitida por diferentes fuentes luminosas. En una publicación, dedicada al análisis de la luz emitida por varias fuentes luminosas, defendía una vez más que los incrementos de emisión en el espectro visible no guardan relación de proporcionalidad con los experimentados en términos de luz (Nichols, E. L., Franklin, W.S. 1889). Su análisis le llevó a la conclusión de que las diferentes longitudes de onda que constituyen el espectro visible no generan luz en proporción a su energía; y que las longitudes de onda que producen mayor sensación de luz se corresponden con el color amarillo, decayendo rápidamente al acercarnos al rojo y al violeta. Ese mismo año, Nichols dicta una conferencia en el American Institute of Electrical Engineers (Nichols, E.L. 1889) con la que estimula en el ámbito científico el debate en torno a la validez universal de los patrones fotométricos vigentes. En el texto leído, Nichols realizó una profunda

reflexión sobre las limitaciones de la fotometría tal y como era concebida en aquel momento. Destacamos a continuación los puntos más interesantes de esta disertación:

En primer lugar, resulta interesante la reflexión que realiza en torno a la relación energía-brillo, incidiendo en la variación de la calidad lumínica y la eficiencia energética que experimentan las fuentes luminosas incandescentes al incrementar su temperatura de trabajo. Introduce, en este punto, una nueva perspectiva al indicar la imposibilidad de expresar estas variaciones mediante los patrones fotométricos del momento. Como apoyo a esta idea presentó una interpretación gráfica de los datos de Vierordt, señalando el “poder lumínico” de las diferentes longitudes de onda y la región del espectro cuya luminosidad es máxima (que posteriormente será denominada máxima sensibilidad espectral). En su análisis destaca que las longitudes de onda que aportan más luz corresponden a las radiaciones de color amarillento y que la luminosidad relativa desciende rápidamente al acercarnos a los dos extremos:

(...) Al incrementar la temperatura de incandescencia, la ratio entre la energía luminosa y la energía total radiada decrece lentamente, y al mismo tiempo, el brillo relativo de las diferentes bandas que constituyen el espectro visible cambia. En una palabra, la calidad de la luz cambia, y nos enfrentamos a una importante variación que no puede ser expresada en candlepower

La investigación de estos cambios en la composición, de los que depende el color, involucra al estudio del espectro lumínico de la fuente de luz y a la comparación de su intensidad, longitud onda por longitud de onda, con la del espectro de algún estándar razonablemente elegido.

E.L. Nichols, The efficiency of methods of artificial illumination; 1889.

Las reflexiones de Nichols están basadas en los estudios espectrofotométricos citados anteriormente. De los mismos deduce que, al aumentar la intensidad de la emisión en la zona final del espectro correspondiente al color rojo, el incremento que se produce en términos de emisión luminosa es superior; al contrario, según nos indica de lo que ocurre en el extremo violeta. En su exposición sugiere la existencia de una longitud de onda intermedia en la cual la emisión (medida en candlepower) es proporcional al brillo de la fuente. Cabe decir que estas afirmaciones no son del todo congruentes con los valores establecidos en la curva de sensibilidad finalmente aprobada en 1923; sin embargo, el mero planteamiento de esta posibilidad constituye un punto de partida para la reflexión que permitirá desarrollar estos conceptos en una fase posterior.

En segundo lugar, añadió que se aprecia una variación significativa del brillo de las diferentes longitudes de onda de una fuente incandescente, que depende de la temperatura del cuerpo; temperatura que, por otra parte, también afecta a la relación entre la energía radiante y la energía total emitida. Sugiere una vez más que esta variación es consecuencia de que los haces emitidos en distintas longitudes de onda no intervienen en la producción de luz en proporción a su energía.

Poco tiempo después todas estas apreciaciones encuentran eco en los tratados de fotometría más importantes de la época. Tal es el caso del tratado de fotometría industrial (Palaz, A. 1892), donde se hace notar que, desde un punto de vista fotométrico, la intensidad luminosa de un haz de luz no es equivalente a la energía del movimiento vibratorio del éter; sino que se trata de la acción de esta energía en nuestro sistema visual.

En todos los estudios mencionados (Vierordt, Langley, König y Nichols) se vislumbra la idea de la sensibilidad espectral; sin embargo, el concepto no

está suficientemente afianzado, y será necesario un largo proceso de maduración para que los esfuerzos de las investigaciones se orienten hacia la determinación de la eficiencia relativa. Sirva a modo ilustrativo el estudio desarrollado por Angström a principios del siglo XX, donde se retorna una vez más a un enfoque puramente mecanicista de la unidad de la luz (Ångström, K. 1902). Tras estas aproximaciones iniciales, el concepto de eficiencia luminosa espectral continuó evolucionando hasta la aprobación, en 1923, de la propuesta de Gibson y Tyndall.

2.4 Primeras expresiones de la eficiencia luminosa (1900-1912).

Durante la exhibición internacional de París de 1900, se celebró el Congreso Internacional del Gas, en el cual se acordó la creación de un organismo internacional para la estandarización de la fotometría. Durante el discurso de apertura del Congreso, el profesor T. Vaultier incidió en la necesidad de concretar un estándar metodológico para la medición de la luz producida por los gases incandescentes:

El Congreso Internacional de la Industria del Gas, considerando que es del interés general y común de los productores, así como de los consumidores de gas, estar exactamente informado del poder de iluminación de las lámparas incandescentes de gas. decide:

Se nombrará una Comisión Internacional para establecer las reglas a seguir en las observaciones fotométricas de las boquillas incandescentes de gas (...)

T. Vaultier, International Congress of Gas Industry; 1900.

La resolución fue aceptada de forma unánime, creándose la Comisión Internacional de Fotometría, que se reunió por primera vez en 1903, en una sesión que se desarrolló en Zurich. Frente a otras entidades creadas con el mismo fin, la importancia de esta comisión radica en su carácter internacional y en el talante integrador con que se desarrollaron las primeras sesiones. Gracias a ello, el organismo, que inicialmente estaba constituido por representantes de las diferentes Sociedades Técnicas Nacionales del Gas, amplió su composición para integrar a representantes de otros sectores. Así, en la tercera sesión, Zurich (1911), la Comisión acordó solicitar representación a los diferentes Comités Electrotécnicos Nacionales. Se iniciaba de esta forma una transformación que derivaría en la actual Comisión Internacional de Iluminación.

Hacia 1905, la comunidad científica tenía plena conciencia de que, para definir la luz en términos de radiación que estimula el sistema visual, era necesario formular una función de visibilidad de la radiación determinada para el ojo normal medio. La literatura científica en este periodo inicial está fundamentada en los datos presentados por Langley, König y Dieterici,

En 1905, C.E. Guillaume, basándose en los planteamientos de Langley y König, desarrolló en un primer intento de ponderar la “radiación luminosa” en función de la sensibilidad espectral del ojo humano un nuevo concepto, la “eficiencia luminosa reducida”. De esta forma, el término “eficiencia total” (ecuación 1), definido por Nichols como la relación entre la radiación luminosa y el consumo global de la fuente, quedaría afectado por un coeficiente dependiente de la longitud de onda (ecuación 2) que lo reduciría a un estándar monocromático de 540 nm de longitud de onda.

Ecuación 1: Eficiencia total (Nichols, 1889)

$$\text{Eficiencia total (Nichols, 1889): } \eta = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{\lambda} d\lambda}{Q}$$

Donde:

η , es la eficiencia luminosa (denominada por Nichols eficiencia total)

Q , es la energía total consumida por la fuente luminosa.

λ_1 y λ_2 , los límites del espectro visible (Nichols los estableció en 390 y 760 nm)

I_{λ} , la intensidad luminosa emitida en las diferentes regiones del espectro visible

Ecuación 2: Eficiencia luminosa reducida (Guillaume, 1905)

$$\text{Eficiencia luminosa reducida (Guillaume, 1905): } \eta_{\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} k_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda}{Q}$$

Donde:

η_{λ} , es la eficiencia luminosa reducida

Q , es la energía total consumida por la fuente luminosa.

k_{λ} , es un factor de sensibilidad (máximo para 540 nm) dependiente de la longitud de onda

I_{λ} , la intensidad luminosa emitida en las diferentes regiones del espectro

El concepto planteado por Guillaume, tuvo gran aceptación y fue rápidamente incorporado y desarrollado por otros autores; tal es el caso de Drysdale (1907), que lo aplica en su cálculo del equivalente mecánico de la luz; o H.E. Ives y W.W. Coblentz (1908), que lo toman en consideración en un curioso estudio orientado a valorar la eficiencia luminosa de la luz emitida por las luciérnagas. El procedimiento utilizado por Ives y Coblentz consiste en multiplicar la energía en cada punto por la fracción que representa su valor de intensidad

visual relativa; pudiendo obtener, de esta forma, la eficiencia luminosa de la fuente analizada. Los autores defendían la posibilidad de calcular el valor de intensidad de cualquier distribución energética si se conocen los valores de intensidad visual relativa de los diferentes colores del espectro

La eficiencia luminosa reducida desarrollado por Guillaume constituyó, tras ser sometida a múltiples correcciones y transformaciones, la base sobre la que se desarrolla la actual curva de eficiencia luminosa relativa espectral, motivo por el cual parece razonable dar a su autor el lugar que le corresponde. A partir de su propuesta, la orientación de las investigaciones se modifica y la expresión “equivalente mecánico de la luz” va dando paso, de forma progresiva a “equivalente luminoso de la radiación”.

Nutting (1907), ahonda en la necesidad de establecer una función de visibilidad de la radiación, $V(\lambda)$, que relacione el estímulo que genera el proceso visual (radiación), con la sensación producida (luz). El producto de esta función por cualquier curva de distribución de espectral de radiación, $E(\lambda)$, permitiría obtener una curva $L(\lambda)$ representativa de la luminosidad o intensidad óptica de la radiación analizada. Según Nutting, la determinación de la función de visibilidad, $V(\lambda)$, constituye el primer paso para la resolución del problema fotométrico. En su artículo, podemos encontrar nuevas reflexiones procedentes de la psicología de la percepción y de la óptica fisiológica; y plantea, por ejemplo, el problema de la adaptación el sistema visual a la intensidad del estímulo, que trata de caracterizar en base a una segunda función de sensibilidad dependiente de la luminosidad que estaba referenciada a la ley de Fechner. La inclusión de esta segunda función le lleva a establecer diferentes curvas de sensibilidad que dependen de la intensidad del estímulo y que guardan cierta relación con la actual clasificación de los estímulos en fotópicos, mesópicos y escotópicos; relación refrendada por la indicación de que la curva de visibilidad media para bajas intensidades no varía para observadores con ceguera, parcial o completa,

al color; en tanto la curva elaborada para intensidades altas si presenta variaciones significativas en estos casos. Cabe mencionar, en este punto, que la curva de sensibilidad definida por Gibson y Tyndall no tomó en consideración esta segunda función dado que hubiese implicado una dificultad añadida a un desarrollo ya de por sí complejo. En su lugar, la curva definitivamente adoptada por la comisión estandariza una luminosidad suficientemente elevada que permitirá obviar el problema de la adaptación. En relación a la universalidad de las curvas de sensibilidad, Nutting incluye una breve reflexión sobre el tema:

El problema físico no requiere una función especial que represente estrictamente la curva de cada individuo particular. Lo que se requiere es una única función general lo más simple posible con los parámetros que representen las propiedades del ojo humano tipo. (...) Los trabajos especiales requerirán de una investigación especial de las propiedades del ojo del observador en el momento de desarrollar la tarea. El problema general de la iluminación requerirá, sin embargo, la especificación de las propiedades del ojo estándar promediado.

P.G. Nutting, The luminous equivalent of radiation; 1907.

Sobre la base establecida por Nutting se desarrollaron, entre 1912 y 1923, una serie de investigaciones sobre las que se sustenta la curva de sensibilidad espectral.

CAPÍTULO 3.

ESTADO DEL ARTE

CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE

La fotometría es una rama de la física que, según el diccionario de la Real Academia de Ingeniería “se encarga de la medida de la luz como el brillo percibido por el ojo humano, es decir, estudia la capacidad que tiene la radiación electromagnética de estimular el sistema visual” (RAI, 2020). Sin embargo, los pilares de esta ciencia escapan de la propia física, incorporando elementos que provienen de otros campos; tal es el caso de la óptica fisiológica, o la psicología de la percepción. Consecuentemente, el capítulo dedicado al estado del arte se ha estructurado atendiendo al área de procedencia de las diferentes investigaciones analizadas:

- Aportaciones procedentes del campo de la física:
 - Principales estudios considerados por Gibson y Tyndall en la elaboración de su propuesta
 - Propuestas de función de sensibilidad alternativas.
- Aportaciones procedentes del campo de la óptica fisiológica.
 - Estudios de carácter óptico.
 - Estudios de carácter fisiológico.
- Estudios procedentes de la psicología de la percepción y la psicología ambiental.

3.1.- Aportaciones procedentes del campo de la física.

3.1.1.- Principales estudios considerados por Gibson y Tyndall.

A. Studies in the photometry of lights of different colours (Ives, H. E. 1912).

Como se ha mencionado anteriormente, la fotometría tal y como había sido concebida durante el siglo XIX, no era aplicable a las nuevas tecnologías; que presentaban una distribución cromática diferente a la de los cuerpos incandescentes. Por este motivo, Herbert E. Ives realizó una amplia investigación relativa a la fotometría heterocromática. Los resultados de su trabajo fueron publicados en un extenso estudio, dividido en cinco partes, en el que se discutían diferentes aspectos relativos al posible enfoque de la fotometría. El interés de este estudio radica en que la toma de datos de Gibson y Tyndall se realizó, según ellos mismos nos indican, siguiendo muchas de las recomendaciones dadas por Ives en esta publicación.

- I. Spectral Luminosity Curves obtained by the Equality of Brightness Photometer and the Flicker Photometer under similar conditions. (pg. 149)
- II. Spectral Luminosity Curves obtained by the Method of Critical Frequency (pg. 352)
- III. Distorsions in Spectral Luminosity Curves produced by Variations in the Character of the Comparison Standard and the Surroundings of the Photometric Field (pg. 744)
- IV. The Addition of Luminosities of Different Colours (pg. 845)
- V. The Spectral Luminosity Curve of the Average Eye (pg.853)

Para la elaboración de su propuesta de curva de sensibilidad espectral, Ives llevo a cabo una toma de datos mediante fotometría de parpadeo sobre un total de 18 observadores de entre 18 y 40 años (figura 6), si bien no se

Capítulo 3. Estado del arte

especificada la edad de cada uno de ellos. El estudio se limitó a longitudes de onda entre 480 y 680 nm. Las condiciones del campo visual utilizado fueron de 2º de amplitud y una luminancia que oscilaba entre las 250 y las 300 cd/m².

Normal Spectrum Luminosity Curves of Eighteen Observers.

Observer.	·481	·498	·518	·537	·556	·576	·595	·615	·635	·655 μ
1. P.W.C.	3·4	5·9	13·75	17·4	17·95	17·1	14·0	9·55	5·2	1·7
2. L.H.K.	4·15	7·1	15·5	18·7	18·6	16·5	12·2	7·5	3·65	1·15
3. E.J.E.	3·05	5·9	13·8	18·4	18·95	17·15	13·35	8·65	3·85	1·4
4. W.M.M.	3·6	7·4	15·2	18·45	19·05	16·65	12·45	7·75	3·8	1·15
5. M.D.C.	3·3	6·55	15·0	19·3	19·25	17·6	12·75	7·65	3·45	1·35
6. F.E.C.	2·3	5·05	13·9	17·9	19·1	17·55	14·3	9·4	4·95	1·95
7. M.L.I.	3·25	5·45	12·75	17·8	18·9	17·8	13·7	9·05	4·55	1·9
8. M.L.	3·3	7·7	14·2	18·7	19·8	18·2	12·3	7·3	3·45	1·35
9. H.A.R.	3·3	6·9	14·2	17·7	17·8	17·2	13·45	9·0	4·65	2·00
10. L.R.G.	2·65	6·95	15·9	19·55	19·9	17·2	12·3	7·7	2·9	0·9
11. M.M.	3·9	7·2	14·7	17·35	18·5	16·65	13·15	8·05	3·40	1·2
12. C.F.L.	2·7	5·45	13·2	18·1	18·7	17·5	14·15	9·2	4·9	1·6
13. A.J.S.	2·55	5·7	15·2	19·05	19·5	17·45	13·5	8·25	4·1	1·4
14. A.W.	1·6	3·65	12·65	16·9	18·05	18·25	15·6	11·05	5·85	2·3
15. H.H.M.	2·6	6·1	14·85	18·0	19·45	17·8	13·95	8·4	4·15	1·3
16. T.W.R.	3·7	7·4	14·15	19·9	20·1	17·5	12·0	6·7	3·15	1·25
17. H.E.I.	3·0	6·1	15·35	18·75	19·3	17·4	13·45	8·25	3·9	1·5
18. G.C.	2·15	5·2	12·6	18·8	19·4	17·1	14·0	9·3	5·0	1·6
Mean	3·03	6·2	14·55	18·38	19·03	17·47	13·36	8·52	4·16	1·5

Figura 6. Valores de luminosidad espectral propuestos por Herbert E. Ives en 1912.

B. The visibility of radiation. (Nutting, P.G. 1914).

La toma de datos de Nutting se desarrolló en el mismo periodo y situación que la de Ives, con la peculiaridad de que la lámpara utilizada en este caso no era eléctrica, sino de llama de acetileno. Por este motivo, Gibson y Tyndall tuvieron que realizar algunas verificaciones antes de comparar los resultados obtenidos en ambos estudios. La metodología utilizada fue la fotometría de parpadeo, con una amplitud de campo de 2º y un brillo, según nos indican Gibson y Tyndall, algo superior al utilizado por Ives. El rango de longitudes de onda estudiado abarca desde los 490 a los 640 nm. Los valores medios propuestos por Nutting para un total de 21 observadores, presentan desviaciones importantes en la región azul del espectro en relación a la propuesta final

Capítulo 3. Estado del arte

publicada por la CIE (figura 7). Al igual que en el caso de Ives, no disponemos de información referente a la edad específica de cada observador. La versión de los datos empleada por Gibson y Tyndall corresponde a una revisión publicada en el Journal of the Optical Society of América el año 1920.

RADIATION VISIBILITY DATA.													
Subject	$\lambda_{0.49}$	0.50	0.52	0.53	0.54	0.55	0.56	0.57	0.58	0.60	0.62	0.64	Amx.
L. A. J. . .	0.192	0.274	0.715	0.888	1.006	1.042	1.026	0.953	0.812	0.577	0.308	0.132	0.5520
F. A. E. . .	0.248	0.350	0.662	0.819	0.910	0.967	0.976	0.934	0.863	0.632	0.351	0.160	0.5573
J. R. H. . .	0.234	0.367	0.705	0.863	0.952	0.982	0.977	0.924	0.816	0.572	0.334	0.149	0.5533
J. I. C. . .	0.196	0.287	0.610	0.787	0.913	0.970	0.975	0.954	0.886	0.673	0.385	0.188	0.5577
J. G. C. . .	0.304	0.440	0.751	0.855	0.917	0.947	0.940	0.891	0.810	0.562	0.316	0.147	0.5530
H. L. H. . .	0.237	0.358	0.686	0.811	0.911	0.963	0.965	0.935	0.859	0.626	0.359	0.175	0.5570
V. G. M. . .	0.146	0.250	0.618	0.794	0.915	0.970	0.986	0.962	0.892	0.669	0.391	0.183	0.5580
L. E. J. . .	0.223	0.330	0.612	0.766	0.876	0.929	0.946	0.923	0.857	0.673	0.415	0.202	0.5597
L. W. E. . .	0.221	0.311	0.679	0.841	0.960	1.010	1.016	0.959	0.863	0.604	0.335	0.146	0.5550
L. M. F. . .	0.253	0.370	0.688	0.838	0.934	0.985	0.886	0.942	0.854	0.602	0.222	0.163	0.5560
M. B. S. . .	0.185	0.293	0.650	0.841	0.972	1.036	1.031	0.963	0.829	0.572	0.340	0.223	0.5547
W. R. F. . .	0.399	0.507	0.796	0.919	0.986	1.000	0.968	0.888	0.775	0.493	0.247	0.144	0.5490
C. W. F. . .	0.238	0.313	0.701	0.854	0.944	0.988	0.991	0.955	0.871	0.608	0.323	0.130	0.5553
M. B. H. . .	0.167	0.255	0.626	0.834	0.963	1.023	1.022	0.966	0.870	0.640	0.356	0.173	0.5550
O. T. . . .	0.263	0.367	0.661	0.804	0.924	0.975	0.967	0.918	0.822	0.593	0.393	0.183	0.5547
M. L. S. . .	0.290	0.369	0.654	0.884	1.021	1.072	1.049	0.958	0.840	0.534	0.270	0.128	0.5523
C. E. S. . .	0.223	0.305	0.589	0.760	0.904	0.986	0.995	0.964	0.893	0.664	0.394	0.176	0.5573
A. McD. . .	0.138	0.245	0.626	0.794	0.918	0.982	0.990	0.950	0.872	0.676	0.393	0.203	0.5553
S. E. S. . .	0.190	0.300	0.658	0.846	0.972	1.035	1.032	0.908	0.850	0.581	0.333	0.138	0.5550
K. H. . . .	0.215	0.372	0.697	0.851	0.932	0.972	0.979	0.942	0.854	0.595	0.333	0.153	0.5540
P. G. N. . .	0.182	0.273	0.714	0.878	0.996	1.055	1.038	0.978	0.845	0.568	0.285	0.136	0.5532
Average . .	0.227	0.330	0.671	0.835	0.944	0.995	0.993	0.944	0.851	0.605	0.342	0.163	0.5550

Figura 7. Valores de visibilidad de la radiación propuestos por Nutting en 1914.

C. Patterson and Dudding, Proc. Phyl. Soc. London, 27, 203 (1914-1915)

D. An 'average eye' for heterochromatic photometry, and a comparison of a flicker and an equality-of-brightness photometer. (Crittenden, E. C., & Richtmyer, F. K. 1917).

Las conclusiones de este estudio resultan interesantes, de cara a establecer ciertas limitaciones de la curva de sensibilidad espectral. Según nos indican sus autores, el método fotométrico de igualación de campos es más preciso que la fotometría de parpadeo siempre y cuando se trata de igualar estímulos exactamente iguales desde un punto de vista cromático. Sin embargo, la introducción de pequeñas variaciones en la longitud de onda conduce, en esta metodología, a una pérdida significativa de precisión. Se trata de un análisis que

se fundamenta sobre una toma de datos realizada por Ives en 1915, por lo que no aporta información referente a los 115 observadores considerados.

- E. Relative sensibility of the average eye to light of different colors and some practical applications to radiation problems. (Coblentz, W. W., & Emerson, W. B. 1917).

El brillo utilizado por Coblentz y Emerson en su toma de datos era la cuarta parte del utilizado por Ives; motivo al cual atribuyen las diferencias de las curvas de sensibilidad propuestas en ambos casos. La medición fue llevada a cabo sobre un total de 125 observadores (26 de los cuales presentaban algún tipo de patología) mediante fotometría de parpadeo. La extensión del campo visual observado es de 2° (figura 8). Los resultados obtenidos coinciden sensiblemente con los del resto de trabajos en la región central del espectro, si bien se valora una mayor sensibilidad al rojo, y aparecen diferencias por debajo de 490 nm. Cabe mencionar que 18 de los observadores participaron posteriormente en la toma de datos de Gibson y Tyndall, pudiendo detectarse variaciones significativas en los resultados obtenidos en ambos casos. La explicación para estas variaciones, sugerida en el documento de 1923, hace referencia a posibles errores en la medición de la energía por parte de Coblentz y Emerson. La documentación de este estudio incorpora una tabla que recoge los valores de sensibilidad relativa obtenidos para cada observador, incluyendo datos referentes a la edad y género. La dispersión de los resultados es sensiblemente superior a la calculada a partir de los datos de Gibson y Tyndall.

Capítulo 3. Estado del arte

Subject	Visi- bility	Age	Eye color	Fac- tor	$\lambda=$ 0.427	$\lambda=$ 0.435	$\lambda=$ 0.444	$\lambda=$ 0.450	$\lambda=$ 0.456	$\lambda=$ 0.463	$\lambda=$ 0.474	$\lambda=$ 0.485	$\lambda=$ 0.493	$\lambda=$ 0.502	$\lambda=$ 0.5125	$\lambda=$ 0.523	$\lambda=$ 0.534	$\lambda=$ 0.546	$\lambda=$ 0.552	$\lambda=$ 0.559	$\lambda=$ 0.573
C. F. H.	N.	32	L. Bl.	1.27	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	205	342	544	794	913	1000	996	997	967
F. A. W.	R. S.	26	Br.	1.32	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	193	352	520	721	883	966	990	990	987
A. H. T.	R. S.	30	.....	1.22	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	257	499	762	866	934	981	1000	977
H. G. B.	N.	35	Br.	1.23	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	215	365	584	826	913	1027	.....	982	948
E. D. W.	G. S.	24	L. Bl.	1.23	.....	.....	.....	27.0	38.0	52.2	73.3	122.0	200	360	545	707	882	973	1006	994	947
H. B. S.	B. S.	30	.....	1.04	.....	40.3	57.1	66.2	88.6	107.0	171.0	261.0	341	480	657	792	913	995	989	987	867
C. G. C.	R. S.	23	Bl.	1.20	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	141	260	473	690	849	957	982	967	959
J. S. P.	N.	21	Bl.	1.08	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	267	402	596	743	849	930	986	1010	935
A. N. G.	N.	29	Bl.	1.10	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	261	392	606	817	877	962	991	1000	988
A. M. P.	G. S.	27	Bl.	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	179	311	503	708	872	968	997	1000	925
W. J. K.	N.	24	.....	1.12	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	232	385	567	786	880	991	1000	986	931
R. E. L.	Sub. R.	37	Bl.	1.00	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	170	289	511	775	912	998	1040	1000	934
H. W. B.	B. S.	34	.....	1.25	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	304	445	605	775	928	971	.....	1000	950
E. D. G.	Sub. R.	28	Bl.	1.15	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	211	358	586	778	948	1000	1000	990	917
R. M. W.	R. S.	27	Bl.	1.37	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	253	380	532	726	844	941	967	987	1000
L. R. H.	R. S.	19	Br.	1.32	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	175	321	506	724	887	983	987	986	971
W. S. J.	R. S.	24	Bl.	1.24	.....	37.8	45.4	49.0	60.2	79.6	115.0	161.0	242	364	546	771	892	960	974	1000	975
R. W. W./	G. S.	22	Gr.	.....	.....	24.7	25.9	27.5	32.5	52.9	77.3	130.0	176	310	538	777	920	982	998	1000	940
H. B. H.	N.	22	Br.	1.23	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	246	388	560	748	903	981	1010	989	954
E. F. M.	B. S.	33	Br.	1.25	38.6	53.0	62.8	71.2	97.4	124.0	164.0	259.0	335	470	631	786	877	937	1000	997	944
H. A. B.	Sub. B.	25	Bl.	1.13	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	138	254	465	715	878	941	989	980	980
D. H. S.	Sub. R.	26	Br.	1.08	.....	.....	.....	.....	.....	21.7	33.1	57.8	87.3	138	254	465	715	878	941	989	980
W. C. B.	W.	33	Bl.	1.23	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	258.0	343	477	654	831	932	986	992	1000
R. C. S.	B. S.	29	Br.	1.10	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	190.0	296	454	666	814	960	1000	990	1040
M. H. S.	B. S.	30	Gr.	1.08	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	198.0	284	427	638	819	924	983	986	1000
G. W. M.	Sub. B.	46	Gr.	1.20	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	183	311	544	760	890	992	1006	966	958
A. L. T.	G. S.	26	Bl.	1.03	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	163	293	534	754	925	968	960	990	930
A. F. P.	Sub. B.	43	.....	1.12	.....	.....	.....	.....	22.4	33.8	55.6	85.2	135	275	482	739	876	961	1000	993	951

Figura 8. Extracto de la tabla de visibilidad para observadores normales. Coblenz y Emerson.

F. The visibility of radiation. [La visibilidad de la radiación]. (Reeves, P., 1918).

En la toma de datos participaron 13 observadores que visualizaban un campo con un nivel de iluminación constante de 140 lx. Las mediciones se acotaron al rango de 490-640 nm. El estudio carece de una definición apropiada, y no se dispone de datos referentes a las dimensiones del campo, las características de los visores o la edad de los observadores. Los datos de este estudio analizados por Gibson y Tyndall corresponden a una revisión posterior (Hyde et al. 1918).

G. The visibility of radiation. [La visibilidad de la radiación]. (Hyde, E.P., Forsythe, W.E. and Cady, F.E. 1918).

En el documento no se hace referencia a la edad de los 29 observadores que participaron de la toma de datos, desarrollada conforme a método de equivalencia de brillo. Cabe resaltar que el campo visual empleado, de 7°,

excede sensiblemente de la región foveal; y que el nivel de iluminancia del campo variaba dependiendo de la longitud de onda. Las iluminancias estimadas por los propios autores son de 30 lx, 150 lx y 90 lx para las longitudes de onda de 500 nm, 560 nm y 650 nm respectivamente. Las mediciones se limitaron a un rango entre 500 y 660 nm. Para completar su propuesta de función tomaron en consideración datos provenientes de estudios anteriores.

H. The photometric scale. [La escala fotométrica] (Ives, H. E., 1919).

El estudio no aporta información referente a nuevos observadores, limitándose a analizar la situación de la fotometría conforme a los estudios desarrollados hasta ese momento.

I. Proceedings of de Physiks and Mathematic Society of Japan, 2, 177 (So, 1920)

De todos los estudios tomados en consideración por Gibson y Tyndall, el realizado por So fue el único que difería en la raza de los observadores. Se tomaron datos por el método de parpadeo sobre un total de 20 individuos de origen japonés con edades comprendidas entre los 18 y los 48 años. Con base en este estudio Gibson y Tyndall realizan su afirmación de que las diferencias etnológicas no parecen afectar a la función de sensibilidad.

J. Journal of the Optical Society of America, 4, 398, 471 (Priest, 1920)

Las tablas presentadas a continuación resumen los datos extraídos de estas investigaciones en relación a la edad de los observadores analizados (tabla 7) y a las condiciones en que se desarrollaron las diferentes tomas de datos (tabla 8)

Tabla 7. Edad de los participantes en las tomas de datos consideradas por Gibson y Tyndall.

Edad	Número de observadores normales										Gibson/Tyndall
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
[16-20]	18	S/D	-	S/D	2	S/D	S/D	S/D	20	S/D	
[21-25]					29						5
[26-30]					33						15
[31-35]					18						17
[36-40]					8						5
[41-45]					6						7
[46-50]					2						1
[51-55]					-						2
[56-60]					1						
[61-65]					-						
[66-70]					-						
Total	18	21	-	115*	99	13	29	S/D	20	S/D	52
* Los datos empleados corresponden a investigaciones anteriores.											

Tabla 8. Condiciones de observación de las tomas de datos consideradas por Gibson y Tyndall.

Estudio	Métodos*	Muestra	Longitud de onda	Rango extendido	Campo Visual	Luminancia Iluminancia
A	FP	18	480-660	-	2°	300 cd/m ²
B	FP	21	490-640	400-700	2°	350 cd/m ²
C		-	-	-	-	-
D	FP/DBM	115	-	-	-	-
E	FP	99	490-680	435-750	2°	75 cd/m ²
F	FP	13	490-640	-	-	-
G	DBM	29	500-660	-	7°	-
H	-	-	-	-	-	-
I	FP	20	500-680	500-680	1,5°	-
J	-	-	-	-	-	-
Gibson/Tyndall	DBM	52	430-740		3°	
* (FP) Flicker Photometry o (DBM) Direct Brightness Matching

3.1.2.- Propuestas de función de sensibilidad espectral alternativas

Los participantes de la comisión de 1924 eran conscientes de las limitaciones de la función que proponían; y tuvieron la cautela de dar el carácter de provisionales a los valores adoptados para la misma. Así, por ejemplo, en el momento de aprobación de la curva no se tenía certeza de la correspondencia real entre la luminancia, matemáticamente definida, y la sensación de brillo percibida por el observador. El reconocimiento de estas limitaciones por parte de la CIE en 1959 supuso la redefinición del término “flujo luminoso” eliminando las referencias a “la sensación de luz producida”; y, posteriormente, la modificación de la expresión “visibilidad relativa”, que fue sustituida por “eficiencia luminosa relativa espectral” en 1983.

Ahondando en las diferencias entre brillo y luminancia, el estudio del proceso perceptivo desde una perspectiva neurológica ha permitido establecer la existencia de múltiples canales de transferencia de información (Luna, D.; Tudela, P. 2006); algunos de los cuales no cumplen con la ley de aditividad de Abney¹ sobre la cual se sustenta la expresión matemática de la luminancia (ecuación 3). Consecuentemente, las funciones de eficiencia luminosa espectral para campos visuales de 2º y 10º publicadas por la CIE en 1988 modelizan, aunque con ciertas limitaciones, las sensaciones de brillo producidas por radiaciones de luz monocromáticas, pero su aplicación para valorar la sensación de brillo producida por radiaciones heterocromáticas no ha sido definitivamente valorada:

¹ Esta ley constituye uno de los pilares sobre los que se asienta la teoría tricromática. Fue enunciada por William Abney durante la segunda mitad del siglo XIX, y establece que al mezclar luces de diferentes longitudes de onda la luminancia resultante coincide con la suma de las luminancias de los estímulos independientes.

Ecuación 3: Expresión matemática de la luminancia

$$L_v = K_m \int_0^{\infty} L_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

Donde:

L_v es el flujo luminoso

$L_{e\lambda}$ es el flujo radiante

λ es la longitud de onda

A pesar de estas reticencias, los valores actuales de la función de sensibilidad, aprobada por la CIE en 1991, no presentan variaciones reales en relación a los publicados en 1924; y se limita a completar los mismos por interpolación y extrapolación (tabla 9).

Tabla 9. Valores de sensibilidad relativa para las funciones de sensibilidad de 1924 y 1991.

Longitud de onda (nm)	Visibilidad relativa (1924)	Eficiencia luminosa relativa (1991)
380	—	0.000 039
390	—	0.000 120
400	0.0004	0.000 396
410	0.0012	0.001 210
420	0.0040	0.004 000
430	0.0116	0.011 600
440	0.023	0.023 000
450	0.038	0.038 000
460	0.060	0.060 000
470	0.091	0.090 980
480	0.139	0.139 020
490	0.208	0.208 020
500	0.323	0.323 000
510	0.503	0.503 000
520	0.710	0.710 000
530	0.862	0.862 000
540	0.954	0.954 000
550	0.995	0.994 950
560	0.995	0.995 000
570	0.952	0.952 000
580	0.870	0.870 000
590	0.757	0.757 000
600	0.631	0.631 000
610	0.503	0.503 000
620	0.381	0.381 000
630	0.265	0.265 000
640	0.175	0.175 000
650	0.107	0.107 000
660	0.061	0.061 000
670	0.032	0.032 000
680	0.017	0.017 000
690	0.0082	0.008 210
700	0.0041	0.004 102
710	0.0021	0.002 091
720	0.00105	0.001 047
730	0.00052	0.000 520
740	0.00025	0.000 249
750	0.00012	0.000 120
760	0.00006	0.000 060
770	—	0.000 030
780	—	0.000 015

Con el objeto de tomar en consideración, cuando menos parcialmente, la incidencia de algunas variables, los diferentes organismos implicados (CIE, IES, etc) han debatido propuestas de modificación que tratan de adaptar la función

de sensibilidad espectral a diversas situaciones. Sin embargo, dado que ninguna de estas propuestas ha sido adoptada por la Conferencia Internacional de Pesos y Medidas; las mismas carecen de utilidad práctica, y no han llegado a utilizarse en la fotometría aplicada. Su empleo ha quedado restringido, por tanto, al campo de la investigación.

En 1951, asumido que los valores de la función de sensibilidad espectral $V(\lambda)$ no son universales y que su utilidad está condicionada por los niveles de luminancia, la Comisión Internacional de Iluminación aprobó una tabla de valores para la función de visión escotópica $V'(\lambda)$ (CIE, 1951), basada en los trabajos desarrollados por Crawford en el Laboratorio Nacional de Física de Gran Bretaña y por Wald en la Universidad de Harvard (Crawford, B.H., 1949; Wald, G., 1945). Conforme a las indicaciones de la Asociación Americana de Ingenieros de Iluminación estos valores han de ser utilizados cuando la percepción se desarrolla con luminancias inferiores a $0,01 \text{ cd/m}^2$; en tanto ha de trabajarse con valores de visión fotópica para luminancias superiores a 10 cd/m^2 (DiLaura, 2011). Existe acuerdo en relación a las condiciones (niveles de luminancia, amplitud de campo visual, ...) bajo las cuales deben ser utilizadas las funciones de sensibilidad fotópica y escotópica. Pero, como puede observarse, hay una región de luminancias intermedias que no se corresponde con ninguno de los dos modelos. Este rango, que recibe la denominación de visión mesópica (entre $0,01$ y 10 cd/m^2)², no está satisfactoriamente definido en la actualidad; y existen dos modelos en discusión que, si bien se aproximan en sus planteamientos iniciales, difieren sensiblemente en los resultados de las mediciones fotométricas obtenidas mediante su aplicación (Rea et al, 2004; Goodman et al., 2007).

² Hay cierto desacuerdo en relación al nivel de luminancia que permite pasar del rango de visión fotópica al rango de visión escotópico. En tanto algunos autores lo sitúan alrededor de las 3 cd/m^2 , otros lo elevan hasta las 10 cd/m^2 . Para la selección de los niveles de iluminación de la toma de datos se ha utilizado este último valor por resultar menos restrictivo.

Es necesario resaltar que la mayor parte de situaciones arquitectónicas, y específicamente las vinculadas al ámbito administrativo, responden a niveles de iluminación de carácter fotópico. Así, por ejemplo, la tabla 5.26 de la norma UNE-EN-12464-1:2012, establece unas exigencias de nivel de iluminación de 500 lx para las tareas más habituales del uso oficina (escritura, lectura, tratamiento de datos, ...) y unos valores de 200 lx para las tareas, menos exigentes, de archivo. Si tomamos en consideración el nivel de iluminación establecido para estas últimas, y considerando una reflectancia difusa del 70% para el papel; podemos valorar que este tipo de trabajos se llevan a cabo en rangos de luminancia superiores a las 10 cd/m² (ecuación 4). Consecuentemente, el presente estudio se ha desarrollado en base al sistema fotométrico fotópico³.

Ecuación 4: Cálculo de la luminancia de superficies lambertianas

$$E_{min} = 200 \text{ lx}; \rho_m \cong 0,7$$

$$L = \frac{200 \cdot 0,7}{\pi} \cong 44,56 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \gg 10 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$$

Donde:

E_{min} es el nivel de iluminación mínimo en el plano de trabajo

ρ_m es la reflectancia media difusa del plano de trabajo

L es la luminancia resultante en el plano de la tarea

El mismo año en que la CIE aprobó la función de sensibilidad escotópica, el Comité en Colorimetría y Luz Artificial de los Estados Unidos publicó un informe que destacaba ciertas irregularidades en la función de eficiencia

³ Cabe puntualizar que, pocas actividades en el ámbito arquitectónico se desarrollan con niveles de luminancia mesópicos; tal es el caso de algunas zonas de las salas de proyecciones, de algunas aplicaciones en el ámbito museológico o de circulaciones con bajos niveles de iluminación.

luminosa relativa fotópica (Judd, D.B., 1951). El informe, coordinado por Judd, detalla que la función de sensibilidad $V(\lambda)$ infravalora la respuesta media del sistema visual a las longitudes de onda cortas. El estudio en profundidad de estas deficiencias (Vos, J.J., 1978) condujo a la aprobación oficial, en 1988, de una curva de eficiencia luminosa modificada para la visión fotópica $V_M(\lambda)$ (CIE, 1990) conocida como curva de Judd-Voss. Sin embargo, como se ha indicado anteriormente, no existe un sistema de unidades fotométricas basado en ella y; consecuentemente, su utilización ha quedado restringida al ámbito de la investigación. Cabe aclarar que la corrección realizada para la elaboración de la curva $V_M(\lambda)$ está centrada en las longitudes de onda cortas, por debajo de los 460 nm, y; por este motivo su aplicación a la luz emitida por la mayor parte de fuentes de luz blanca no implica diferencias significativas frente a la métrica original. Así, la eficacia luminosa de lámparas incandescentes se ve afectada en un 0,19%; en tanto las de fluorescentes neutros (3500 K) presenta un incremento del 0,41 % y la de los tubos conocidos como luz día (6500 K) en un 0,8% (Schanda et al., 2002). Como puede observarse, el incremento que supone la utilización de esta función es algo superior en las fuentes de luz fría; hecho que puede justificarse por contener estas un mayor porcentaje de emisión en la región “azul” del espectro.

Asimismo, desde la CIE, conscientes de las rigurosas condiciones de control bajo las que se ha elaborado la fotometría, se han tomado en consideración diversas funciones de sensibilidad con el objeto de adaptarla a otras condiciones visuales. De estas propuestas, merece especial atención la función $V_{10}(\lambda)$, que fue desarrollada en base los datos de igualación de color para un campo visual de 10° obtenidos por diversos autores (Stiles y Burch, 1959; Speranskaya, 1959). Con la adopción de esta curva se pretende valorar la eficiencia luminosa correspondiente a campos de visión periférica más amplios (CIE, 1963; Morren, L., 1979; Rea, M.S., 1999). El incremento experimentado por la eficacia luminosa de diferentes fuentes de luz blanca al aplicar esta

metodología es más significativo que en el caso anterior, desde un 5.5% para fuentes de luz cálida hasta un 8,3% para tubos fluorescentes de luz día (Schanda et al., 2002). No obstante, al igual que la curva $V_M(\lambda)$ la utilización de esta función ha quedado restringida al ámbito teórico. Es necesario destacar, asimismo, que existen discrepancias entre el observador colorimétrico estándar para un ángulo de visión de 10° y su correspondiente observador fotométrico. Algunos autores (Lozano R.D., Palmer D.A., 1968; Wright, 1972) sugieren que estas diferencias pueden ser parcialmente atribuidas a procesos de carácter psicofísico.

Investigaciones más recientes han desembocado en propuestas de funciones de sensibilidad espectral referidas a los niveles de luminancia proporcionados por la iluminación natural (Sharper et al., 2005). Sin embargo, estas tampoco han conducido a fotometrías específicas.

Llegados a este punto, cabe preguntarse por qué motivo todos estos planteamientos no han fructificado en forma de sistemas fotométricos alternativos para las diferentes condiciones visuales. La respuesta es sencilla, la introducción de nuevas métricas, más allá de las necesarias para los niveles de luminancia fotópicos y escotópicos, genera confusión en la interpretación de los resultados e invalida el propio sentido de la fotometría. Por este motivo, desde el punto de vista práctico, parece más razonable analizar las limitaciones del actual sistema y establecer tablas que permitan adaptarlo a las diferentes circunstancias en que puede desarrollarse el proceso perceptivo.

En relación a la necesidad de elaborar nuevas curvas fotométricas, resultan interesantes las siguientes reflexiones (Schanda, J. et al., 2002):

- La función $V(\lambda)$ aprobada por la CIE en 1924 es aplicable a la caracterización de estímulos en fenómenos psicofísicos asociados a la visión foveal; tal es el caso de la agudeza visual, la distinción de

luminancias, el tiempo de reacción, la frecuencia crítica de parpadeo, la minimización del movimiento aparente, ... Sin embargo, el empleo de esta curva para cuantificar estímulos alejados del eje visual supone la introducción de errores; especialmente para las fuentes luminosas con mayor carga en la región azulada del espectro visible.

- La caracterización de estímulos periféricos aún supone un alto grado de incertidumbre. En cualquier caso, para este tipo de análisis es preferible utilizar la función $V_{10}(\lambda)$.
- Bajo ninguna circunstancia puede suponerse que las curvas $V(\lambda)$, $V_{10}(\lambda)$ ó $V_M(\lambda)$ son válidas para caracterizar el brillo percibido; dado que la percepción de brillo no responde a la ley de Abney, que es esencial para las funciones de eficiencia fotópica descritas.

3.2.- Aportaciones procedentes del campo de la óptica fisiológica.

3.2.1.- Estudios de carácter óptico

Los estudios mencionados hasta este momento proceden del campo de la fotometría; y, dado que su principal objetivo es la definición de un sistema métrico universal, la metodología empleada está orientada a minimizar posibles desviaciones individuales o la estratificación de la población por colectivos. Consecuentemente, tanto en su planteamiento, como en la presentación de los resultados, las referencias a la edad de los observadores son escasas y revisten un carácter meramente informativo.

El análisis de los procesos visuales en función de la edad recibe una mayor atención en los estudios desarrollados desde el campo de la óptica; donde podemos encontrar enfoques de muy diversa índole: investigaciones que

analizan las características ópticas de los medios visuales en función de la edad; otras que tratan de determinar la sensibilidad espectral atendiendo a la cantidad de luz que alcanza el plano de la retina, etc.

En cualquiera de los casos, estas investigaciones difieren de las anteriores tanto en el planteamiento, como en la forma de expresar los resultados. Así, por ejemplo, para la determinación de la función de sensibilidad espectral no se analiza la luminancia del campo visual (estímulo distante), sino una nueva magnitud que trata de describir la densidad de flujo luminoso en el plano de la retina (estímulo próximo)⁴. El motivo de esta modificación es que el empleo de objetivos equipados con un diafragma (pupila artificial) de diámetro inferior a la pupila, reduce la cantidad de luz que accede al ojo, modificando la sensación de brillo. Existen diversos estudios que tratan de relacionar la luminancia del campo observado con la densidad de flujo luminoso en el plano de la retina; estudios que determinan que esta última es proporcional al producto del área del objetivo limitante por la luminancia de la superficie observada (Trezona, 1983). Consecuentemente, la cantidad de luz que entra al ojo, medida en trolands, queda definida como el producto del área de la pupila, natural o artificial, en mm² por la luminancia del campo visual en cd/m² (ecuación 5).

Ecuación 5: Relación entre la cantidad de luz que accede al ojo y luminancia observada

$$e_t = L \cdot p$$

Donde:

e_t es la cantidad de luz, medida en trolands, que entra al ojo

L es la luminancia de la superficie, en cd/m²

p es el área de la pupila, expresada en mm²

⁴ Encontramos de nuevo referencias al campo de la psicología de la percepción, que en su vertiente clásica diferencia entre las propiedades físicas de los elementos observados (estímulo distante) y las propiedades de estimulación que actúan sobre nuestros receptores (estímulo próximo)

Conocidos los parámetros experimentales utilizados durante las tomas de datos, resulta factible calcular mediante la aplicación de este concepto la iluminancia en el plano de la retina de los observadores. Sorprende constatar que los valores obtenidos utilizando esta transformación corresponden, para todas las investigaciones sobre las que se sustenta la función de sensibilidad, a la región de visión mesópica (Viikari et Al. 2005).

A las diferencias de planteamiento ya comentadas hemos de añadir algunos aspectos metodológicos que complican aún más la comparación entre estos trabajos y los diseñados para elaborar las funciones de eficiencia espectral. Cabe citar, por ejemplo, el sistema de doble paso, en el cual, tras proyectar un punto en la retina con una luz laser, se utiliza un oftalmoscopio para registrar la luz reflejada en la retina tras atravesar de nuevo los medios oculares (Guirao, A. 1998). Sin embargo, en estas investigaciones, la utilización de dispositivos ópticos impone restricciones que, en la mayor parte de casos, difieren de las establecidas para la elaboración de las funciones de sensibilidad propuestas por la CIE. Así, por ejemplo, en el estudio desarrollado por Bieber y su equipo, el ángulo de observación utilizado (5°) no coincide ni con el de la curva de visión $V(\lambda)$, que es de 2° , ni con el de la curva $V_{10}(\lambda)$, que es de 10° (Bieber *et al*, 1995). Por otra parte, muchos de estos estudios no especifican las condiciones de contorno y de observación en que se ha desarrollado las medidas (luminancias perimétricas, estado de adaptación del observador, ...). En cualquier caso, hemos de incidir una vez más en lo restrictivos que resultan estas metodologías de trabajo en relación a la diversidad de los procesos visuales.

La presentación de los resultados también varía significativamente entre los dos tipos estudios. En los estudios del campo de la óptica suelen presentarse en base a la cantidad de luz que incide en el ojo en función del diámetro pupilar; o al nivel de iluminancia obtenido en el plano de la retina; en tanto en los procedentes del ámbito de la fotometría, están focalizados en la equivalencia de

la sensación de brillo producida por diferentes estímulos cromáticos. Como consecuencia de todas estas diferencias no es viable confrontar de forma directa los estudios procedentes de los dos campos; y resulta necesario proceder a la transformación de los resultados para desplazarlos a un plano de comparación.

Como se ha indicado, el análisis por grupos de edad, casi inexistente en el campo de la fotometría, tiene mayor presencia en el campo de la óptica. Sin embargo, la mayor parte de trabajos están focalizados en el ámbito gerontológico, por encima de los 65 años, o en los colectivos menores de 20; dejando de lado el proceso de evolución que tiene lugar de los 20 a los 65 años. Cabría suponer que esta carencia de interés radica en una escasa desviación de los resultados individuales obtenidos para este rango; pero, de las consideraciones generales publicadas en la novena edición del IES Lighting Handbook (IESNA, 2000) parece deducirse lo contrario:

“La iluminancia en la retina de un individuo tipo de 60 años es solamente la tercera parte que en uno de 20 años, debido al engrosamiento del cristalino y el menor tamaño de la pupila. Además, el punto de focalización cercano de una persona de 20 años se ubica a unos 10 cm de distancia del ojo; en comparación, una persona de 60 años no puede enfocar a distancias inferiores a 1 m.”

Iesna Lighting Handbook, 2001

Dejando de lado las publicaciones referentes a la eficiencia espectral en niños (Dobson, 1976; Peeples & Teller, 1978; Moskowitz & Cook, 1979; Landenhiem & Gordon, 1986, Antis *et al.*, 1986; Teller & Lindsey, 1989; Nusinowitz & Maurer, 1992; Bieber *et al.*, 1994; ...) y otros estudios centrados en al ámbito gerontológico; la variación de la eficiencia luminosa espectral en función de la edad no recibió demasiada atención hasta finales del siglo XX. Una

primera referencia sobre esta temática analiza los datos recabados de 50 observadores en el rango de 19 a 85 años (Kraft, J.M. y Werner, J.S., 1994). Curiosamente, la dimensión del estímulo utilizado, 1.2° , difiere de la empleada en los estudios citados por Gibson y Tyndall. En sus conclusiones, Kraft y Werner determinan que la sensibilidad espectral a las longitudes de onda corta decrece al aumentar la edad.

La línea de trabajo iniciada por Kraft y Werner ha sido continuada en Japón con una toma de datos que abarca un rango de edades de entre 11 y 78 años. El estudio se realiza sobre un total de 91 observadores, para la fotometría de parpadeo; y 97 observadores para la equivalencia de brillo (Sagawa, K. y Takahashi, Y., 2001). En este caso, la dimensión del estímulo, 2° , coincide con la empleada por Gibson y Tyndall. Con los datos obtenidos, Sagawa y Takahashi proponen un total de siete curvas de eficiencia luminosa estructuradas por rangos de edad (figura 9). Estas curvas resultan consistentes con las conclusiones del estudio anterior, manifestándose una pérdida de sensibilidad a las longitudes de onda cortas al aumentar la edad de los observadores.

Figura 9. Funciones de eficiencia luminosa relativa espectral en función de la edad estimadas por Sagawa & Takahashi.

Otros trabajos más recientes diseñados sobre esta base tratan de ahondar en los modelos visuales dependientes de la edad desde un punto de vista computacional (Mantiuk, R.K. y Ramponi, G., 2015). Pero estos estudios no aportan nuevas observaciones y toman como referencia los datos recabados en las mencionadas investigaciones, así como de otros estudios de carácter fisiológico.

3.2.2.- Estudios de carácter fisiológico.

Una segunda línea de trabajos desarrollada desde el ámbito de la óptica está orientada a analizar la variación que experimentan las propiedades de los medios oculares en función de la edad. Parece razonable pensar que, tomando estos estudios como base, resulta posible determinar la cantidad de luz que alcanza el plano de la retina y, consecuentemente, valorar el estímulo generado sobre el sistema visual.

Uno de los efectos más estudiados es la variación que sufre la estructura del cristalino con la edad; variación que conduce a una pérdida de elasticidad progresiva de la lente que afecta a la capacidad de acomodación. Sin embargo, dado que este efecto resulta fácilmente corregible mediante la utilización de dispositivos ópticos sencillos, no se ha tomado en consideración en nuestro estudio. Cabe decir que, incluso en ausencia de patologías refractivas, sigue existiendo una borrosidad residual debida a las aberraciones cromáticas y esféricas; pero, en términos generales, estas deficiencias no parecen trascendentes, dado que son parcialmente compensadas durante el procesamiento de la imagen (DiLaura, 2011, 2.2.3).

Más allá de la presbicia, es posible delimitar diversos factores del sistema visual que evolucionan con la edad y que conducen a un deterioro progresivo de la imagen. Estos factores pueden clasificarse en dos categorías: Por una parte, aquellos que son independientes de la longitud de onda y que, por tanto, sólo están afectados por la cantidad de luz necesaria para desarrollar correctamente las funciones visuales; y, por otra, aquellos que dependen de la longitud de onda y que, por tanto, están afectados tanto por la cantidad de luz como por la calidad cromática de la misma.

La cantidad de luz recibida en la retina afecta a la imagen formada y, consecuentemente, a diferentes parámetros visuales, como la sensibilidad al contraste y la agudeza visual. Un primer factor a considerar es la disminución del diámetro pupilar, que depende de la edad del observador, y que es más acusada para niveles de luminancia bajos. En condiciones de oscuridad el diámetro pupilar decrece de 7-7,5 mm a 4-5 mm entre los 10 y los 60 años (Guirao, A., 1998). Como consecuencia, la capacidad de enfoque mejora y se reducen las aberraciones ópticas; pero también disminuye sensiblemente la cantidad de luz que alcanza el plano de la retina (Weale, R.A., 1992). A los efectos de este

estudio se han tomado en consideración los valores de diámetro pupilar adoptados por la IES (figura 10).

Figura 10. Diámetro de apertura pupilar en función de la edad para una luminancia de 50 cd/m².

Por otra parte, la intensidad de la imagen retiniana está condicionada por la transmitancia de los medios oculares (cornea, humor acuoso, cristalino y humor vítreo) que disminuye, de forma moderada y progresiva, hasta los 60 años; acelerándose el deterioro a partir de esa edad (Pokorny et al., 1987). Las diferentes fuentes consultadas coinciden en que el humor vítreo y el humor acuoso no afectan a la variación de la iluminancia retiniana; y, aparte de una ligera disminución de la transmitancia de la córnea, la mayor parte de la variación corresponde a los cambios sufridos por el cristalino (Boyce, P.R., 2014; Weale, 1988; Werner et al., 2010). Además, estos cambios afectan a su color haciendo que se vuelva más amarillento con el paso de los años; por lo que, la alteración de la transmitancia no es homogénea para todo el espectro visible, y afecta en mayor medida a las longitudes de onda cortas (figura 11).

Figura 11. Transmitancia total de los medios oculares en función de la edad.
(CIE_203:2012).

Hasta ahora nos hemos centrado en la cantidad de luz que alcanza el plano de la retina, sin embargo, existen otros aspectos que afectan a la calidad de la imagen formada. Por una parte, con la edad se incrementa la dispersión interna de la luz; y, por otra, aumenta la cantidad de luz producida dentro del ojo.

El primer fenómeno, conocido como scattering intraocular, se debe a la aparición de inhomogeneidades en los medios oculares; en gran medida por la alteración de los agregados proteicos suspendidos en el cristalino. Esta dispersión, tiene como consecuencia la formación de un velo luminoso uniforme que aumenta la borrosidad y disminuye el contraste. Dado que es producido por la interacción con partículas de "gran" tamaño, resulta independiente de la longitud de onda (Boynton, R.M., Clarke, F.J.J., 1964). El papel de la córnea en este proceso resulta despreciable fuera del ámbito geriátrico; en tanto el cristalino va incrementando la producción de scattering desde las primeras décadas de vida (Weale, 1992). (figura 12)

Figura 12. Transmitancia global y directa (línea discontinua) de los medios oculares (IES, 2001).

En relación a la producción de luz intraocular, que contribuye a la intensificación del velo luminoso, las dos fuentes más relevantes son el cristalino y el epitelio pigmentario retiniano (figura 13). El cristalino incrementa con la edad el porcentaje de la radiación ultravioleta y de onda corta que absorbe y que, posteriormente, reemite en longitudes de onda mayores conforme al desplazamiento de Stokes (Weale, R.A., 1985). De la misma forma, la lipofusina, que se acumula en el epitelio con la edad, provoca un aumento de la fluorescencia del fondo retiniano (Delory et al., 1995).

Figura 13. Esquema de los tejidos oculares. El epitelio pigmentado retinal aparece identificado como RPE. (Peter Hartmann at de.wikipedia)

El deterioro del sistema visual no se limita a la fase óptica, sino que también afecta al nivel receptoral. Sin embargo, parece que la disminución en el número de conos y bastones en la retina no resulta significativa hasta los 60 años (Curcio et al., 1990). Asimismo, se producen cambios histológicos que afectan tanto a la morfología de los fotorreceptores como a la densidad de los fotopigmentos en los conos a partir de los 40 años. percepción.

3.3.- Aportaciones procedentes de la psicología de la percepción.

Los aspectos de carácter neurológico son difícilmente evaluables desde el punto de vista óptico, dado que responden a la actividad interna del sistema cerebral. Asimismo, el desarrollo de los procesos visuales reviste un carácter complejo, y en los mismos se entrelazan de forma insoluble aspectos perceptivos, relacionados con la eficiencia del sistema visual, y cognitivos, relacionados con el procesamiento de la información. Por estos motivos, el

estudio de los procesos visuales también se desarrolla desde el campo de la psicología ambiental y la psicología de la percepción.

En este ámbito encontramos diversas líneas de trabajo referentes a las condiciones de iluminación que permiten optimizar el desarrollo de las tareas del ámbito administrativo. Así, por ejemplo, durante los años 80 Smith & Rea publicaron una serie de artículos referentes a la eficiencia en la ejecución de tareas de carácter administrativo en función de las condiciones de iluminación. De entre sus estudios, resulta especialmente interesante una serie de publicaciones en las que trata de relacionar la eficiencia en la lectura y la revisión de textos en función del nivel de iluminación (Smith, S.W., Rea, M.S. 1978; Smith, S.W., Rea, M.S. 1982), si bien en los mismos no se independizan los aspectos perceptivos de los cognitivos y no se valora la incidencia de la edad. Estos dos estudios son complementados por una tercera publicación en que valoran como afecta la calidad de la luz empleada sobre la eficiencia en las tareas del ámbito administrativo (Smith, S.W., Rea, M.S. 1980); pero como en los dos primeros, no se independiza el tratamiento de los aspectos perceptivos y cognitivos; y tampoco se estructuran las conclusiones en función de la edad.

Paralelamente, Rea publicó otros artículos en los cuales valora la posibilidad de establecer un modelo de eficiencia visual mediante la aplicación de diferentes metodologías relacionadas con la modificación del contraste (Rea, M.S., 1981) o el tiempo de reacción (Rea, M.S., Oullete, M.J. 1988). Una vez más, las conclusiones están elaboradas sin tomar en consideración la edad del observador y dando una valoración conjunta para los aspectos perceptivos y los cognitivos.

Hay diversas publicaciones que tratan de determinar la calidad y cantidad luz requerida para optimizar las tareas genéricas de escritura y lectura. Sin embargo, la mayor parte de estos estudios están centrados en el ámbito

pediátrico (Berman, S.M. et al., 2006; Hartstein, L.E. et al., 2018) o el geriátrico (Geerdinck, L.M. et al., 2009, Owaley, C., 2011). Un análisis reciente de las necesidades de iluminación para dos grupos poblacionales de 30 y 60 años indica que 300 lx son detectados como insuficientes, especialmente en el colectivo de 60 años, en tanto 2700 lx generan sensaciones excesivamente brillantes para ambos colectivos (Schlangen et al., 2015). Sin embargo, este estudio no toma en consideración las características cromáticas de la fuente y, en el mismo, no queda definida la temperatura de color empleada en la toma de datos. Otros intentos de vincular los niveles de iluminación y la temperatura de color están más centrados en la calidad ambiental que en la eficiencia (Newsham et al., 2005; Boyce, P.R., 2006). Estudios posteriores que relacionan la cantidad de luz con la eficiencia y el bienestar no incluyen, una vez más, el tratamiento de los resultados en función de la edad (Aries, M.B.C. et al., 2010; Veitch, J.A. et al., 2010; Veitch, J.A., 2011).

3.4.- Consideración de la edad en la normativa

A pesar de que, durante mucho tiempo, las investigaciones en cada uno de estos campos se han desarrollado de forma independiente, en las dos últimas décadas comienza a apreciarse un cierto grado de integración que responde, en parte, a la diversificación de los grupos de trabajo de la Comisión Internacional de Iluminación y de la Sociedad de Ingenieros de Iluminación (Veitch, J.A. et al., 2019). Gracias a ello, muchas de las investigaciones desarrolladas en los diferentes sectores han podido ser canalizadas, concretándose parcialmente en las actuales normativas de iluminación. Queda, sin embargo, un largo camino por recorrer, dado que el actual sistema de recomendaciones normativas ha obligado a simplificar las variables que intervienen y a renunciar a una gran cantidad del conocimiento generado.

Fruto de estas investigaciones de carácter multidisciplinar, los textos normativos recogen de forma dispersa diferentes factores que afectan al rendimiento visual. Estos factores pueden ser clasificados en tres grupos: los relacionados con el sistema de iluminación, los vinculados a las exigencias de la tarea y los referentes a las condiciones y naturaleza de los observadores (tabla 10). Sin embargo, no todas las variables recogidas reciben la misma atención. Una gran parte del contenido de las normas se centra en definir los niveles de iluminación necesarios para diferentes tipologías de tarea; pero las referencias a otros factores, tal es el caso de la relación de luminancias (que es lo que el sistema visual realmente percibe) o las condiciones de observación, son muy limitadas. Así, por ejemplo, en el mejor de los casos, las normativas fijan niveles de iluminación homogéneos para todo el colectivo laboral (entre 20 y 65 años), y no establecen ningún factor que permita ponderar las necesidades de iluminación en función de la edad. Esta uniformidad resulta incongruente con la afirmación, respaldada por el IES que, como se ha comentado, indica que el nivel de iluminación que se alcanza en la retina de una persona de 60 años es la tercera parte que en la retina de una persona de 20 años. Cabe puntualizar que la mayor parte de estos estudios utiliza, tanto en la toma de datos como en el análisis de los mismos, el sistema fotométrico general, sin tomar en consideración posibles adecuación del mismo a las capacidades específicas de cada caso.

Tabla 10. Factores del rendimiento visual considerados en la normativa ANSI-RP.

(Grondzik, W.T., Wok, A.G., 2019).

Factores del rendimiento visual referentes a la tarea visual	
Factores primarios	Factores secundarios
<ul style="list-style-type: none">- Tamaño- Luminancia- Contraste de luminancias- Contraste de color- Tiempo de exposición	<ul style="list-style-type: none">- Tipo de objeto (Familiaridad, ...) (Factor primario para tareas de lectura)- Exigencias de detalle- Movilidad de la tarea- Patrones periféricos
Factores del rendimiento visual referentes a las condiciones de iluminación	
Factores primarios	Factores secundarios
<ul style="list-style-type: none">- Nivel de iluminación- Deslumbramiento incapacitivo- Deslumbramiento molesto	<ul style="list-style-type: none">- Relación de luminancias- Patrones de brillo- Cromaticidad
Factores del rendimiento visual referentes al observador	
Factores primarios	Factores secundarios
<ul style="list-style-type: none">- Condiciones del sistema visual (salud y edad)- Nivel de adaptación- Nivel de fatiga	<ul style="list-style-type: none">- Impresión subjetiva (factores psicológicos)

Algunos de estos factores quedan establecidos en el instante en que se determina la tipología de tarea, en tanto otros han de ser definidos de forma independiente. Así, por ejemplo, la lectura de textos es una tarea principalmente basada en el contraste de luminancias, en tanto resulta independiente del contraste de color. Por otra parte, resulta interesante recordar una vez más que todos estos textos continúan concretando sus exigencias en forma de niveles de iluminación, en tanto que el ojo no es sensible a esta magnitud física, sino a la luminancia y, más concretamente, al contraste de luminancias.

3.4.1.- La normativa en el ámbito europeo

En el ámbito europeo existen normativas de iluminación desde mediados del siglo XIX; tal es el caso de la “Metropolitan Gas Act”, publicada en 1860 por

el Parlamento del Reino Unido para regular la calidad de los suministros de iluminación de la ciudad de Londres; o de los test fotométricos diseñados por Dumas y Regnault ese mismo año para controlar la calidad de la iluminación urbana de París. En ausencia de un desarrollo sólido de la fotometría, estos primeros textos se centraron básicamente en la cantidad de emisión de las fuentes en el plano horizontal, articulando sus exigencias en torno a los patrones de intensidad luminosa vigentes en la fecha y dejando de lado aquellos aspectos relacionados con el observador y la tarea. En este sentido resultan interesantes algunas reflexiones de la época referentes a la naturaleza de estos textos (Preece, W.H., 1883), ya citadas en el capítulo inicial:

“No deseamos conocer la intensidad de la luz emitida por fuente luminosa, sino la intensidad de iluminación en la superficie del libro que estamos leyendo, o sobre el papel en el que escribimos, o de las paredes en las que colgamos nuestros cuadros, o sobre las superficies de las calles y los pavimentos sobre los que circula el denso tráfico de nuestras ciudades”.

W.H., Preece, On a new standard of illumination and the measurement of light (1883)

Con estas reflexiones Preece plantea la posibilidad de establecer un sistema de medida basado en la superficie iluminada y no en la intensidad del foco emisor. Su propuesta de estándar hace referencia al espacio iluminado por una candela británica estándar a una distancia de 12,7”; equivalente, según el mismo autor, a la iluminación generada por la bujía Carcel francesa en la misma superficie a 1 m de distancia. Sin embargo, el desarrollo de los primeros estándares basados en la iluminancia de la superficie quedó pospuesto hasta bien entrado el siglo XX. Asimismo, las primeras normativas orientadas en este sentido, que se sustentan sobre las recomendaciones publicadas por la CIE, no aparecen hasta finales del siglo XX.

Este tipo de textos, actualmente desarrollados por el CEN (*Comité Européen de Normalisation*) bajo la denominación EN, se transponen al cuerpo normativo de cada país a través de sus diferentes organismos de estandarización; tal es el caso de AENOR (Agencia Española de Normalización) en España, CIBSE (*Chartered Institution of Building Services Engineers*) en el Reino Unido, o DIN (*Deutsches Institut für Normung*) en el caso de Alemania. Cabe mencionar que los textos desarrollados por el CEN no son de obligado cumplimiento en el conjunto de la Comunidad Europea teniendo en la mayor parte de países la categoría de recomendaciones. En el caso de España la obligación de aplicar las normas UNE publicadas por AENOR, emana de su vinculación a otras leyes y decretos de orden superior.

En España existen numerosas normas UNE-EN relacionadas con el sector de la iluminación, pero la gran mayoría están más orientadas a la estandarización de los productos y la eficiencia energética de que a la calidad del ambiente luminoso diseñado. Tal es el caso del Real Decreto 842/2002, que recoge el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión (de obligado cumplimiento) y que incorpora un listado de cerca de trescientas normas UNE-EN de las cuales veintisiete hacen referencia a los dispositivos de iluminación y una al vocabulario electrotécnico en este ámbito.

Por su parte, el Código Técnico de la Edificación⁵ (CTE), también de obligado cumplimiento en nuestro país, acomete parcialmente el estudio de los sistemas de iluminación estableciendo exigencias a su diseño en dos de sus Documentos Básicos. El primero de estos documentos es el CTE-DB-SUA4, que está dedicado a la seguridad frente al riesgo causado por una iluminación inadecuada, y establece unos niveles de iluminación mínimos en las zonas de

⁵ Es necesario puntualizar que, con fecha 27 de diciembre de 2019, se ha publicado en el BOE el Real Decreto 732/2019, de 20 de diciembre, que desarrolla una nueva versión del documento básico DB-HE. En esta versión, que será efectiva a partir del 28 de junio del 2020, las referencias a las normas UNE han sido suprimidas.

circulación de 20 lx para áreas exteriores, 50 lx para garajes interiores y 100 lx para zonas de circulación interior. El segundo documento, referente al ahorro de energía, dedica su capítulo 3 (CTE-DB-HE3) a la eficiencia energética de las instalaciones de iluminación; en el mismo se establecen diferentes requisitos de carácter cualitativo (aprovechamiento de la luz natural, sistemas de control, plan de mantenimiento, ...) así como algunas exigencias cuantitativas referidas a la densidad de potencia del edificio en su conjunto, o el valor de eficiencia energética de la instalación de cada uno de los espacios proyectados.

Lo más interesante del CTE, desde la perspectiva de este trabajo, es la exigencia de establecer los parámetros que definen la calidad y confort lumínico del proyecto. A estos efectos, el Código precisa que se consideran aceptables los valores establecidos en la Norma UNE-EN 12464-1:2012⁶ de iluminación en los lugares de trabajo interiores, la Norma UNE-EN 12464-2:2008 de iluminación en lugares de trabajo exteriores⁷ (referencia que será sustituida en breve por la versión 2016 de la misma norma), y la Norma UNE-EN 12193 de alumbrado en las instalaciones deportivas. Conviene resaltar el uso de la expresión “se consideran aceptables”, dado que deja la puerta abierta a la aplicación de otros criterios y no exige, necesariamente, la aplicación de estas normativas.

A pesar de no ser de obligado cumplimiento, y en ausencia de recomendaciones mejor argumentadas, la aplicación de la norma EN 12464-1:2011 está ampliamente extendida en el sector de la ingeniería y la arquitectura. Es posible, por otra parte, que su cumplimiento pase a ser obligado una vez se apruebe el pre-estándar de eficiencia energética en la edificación que se está desarrollando a nivel europeo bajo la denominación DIN V 18599:2018. Se trata

⁶ En el presente documento las normas europeas EN se han referenciado, en la medida de lo posible, con la denominación correspondiente a su versión española. Sin embargo, cuando se ha citado la normativa en relación al marco de referencia europeo se ha empleado la versión editada por el CEN.

⁷ Existe una versión más actual de la norma citada por el Código Técnico, que fue publicada bajo la denominación UNE-EN-12464-2:2016

de un texto amplio que establece los cálculos necesarios para determinar el comportamiento energético de los edificios. De las once partes que lo componen, la segunda está dedicada a los aspectos exigibles en el diseño de los sistemas de iluminación.

En la misma línea, es necesario citar una serie de normas que se están desarrollando a nivel europea bajo la denominación “conjunto de normas EPB” (*Energy Performance of Buildings*). Este cuerpo normativo intenta armonizar a nivel internacional la metodología para la evaluación de la eficiencia energética de los edificios. El desarrollo de los contenidos relacionados con la iluminación se ha confiado al *Comité Técnico 169* del CEN, el cual ha emitido el informe Técnico CEN/TC169, que se ocupa de la luz y la iluminación y trata, entre otros temas, de los criterios de iluminación para actividades de interior y exterior; así como de la fotometría de sistemas de iluminación. Producto de este trabajo es la reciente publicación de la norma UNE-EN-15193:2019 sobre los requisitos para iluminación relacionados con la eficiencia energética en los edificios, la cual hace referencia una vez más a la norma UNE-EN-12464-1:2012 anteriormente citada.

En última instancia, cabe citar la serie de normas UNE-EN 13201:2004, referente a la iluminación de carreteras, y que da soporte al Reglamento de Eficiencia Energética en las instalaciones de Alumbrado Exterior (de obligado cumplimiento). Este reglamento deberá ser adaptado, en breve, a la edición del año 2015 de la misma norma (UNE-EN 13201:2015). No obstante, los requerimientos de luminancia que establece oscilan entre 0,3 y 2 cd/m², lo que ubica a los procesos regulados por el texto en el ámbito de la visión mesópica. Por este motivo, las recomendaciones establecidas por esta serie de normas no serán utilizadas en este trabajo.

Como se ha indicado, en ausencia de una normativa de obligado cumplimiento que establezca las exigencias de niveles de iluminación

apropiadas para las diferentes tareas; parece razonable tomar en consideración las recomendaciones fijadas por la norma EN 12464-1:2011 por varios motivos:

- Establece los valores de referencia utilizados a nivel europeo para el cálculo de sistemas de iluminación, independientemente de que no sean exigidos de forma obligatoria por ninguna normativa.
- Existe un acuerdo de colaboración entre el CEN y la CIE, que establece la cooperación técnica de ambos organismos. Esta cooperación es extendida, asimismo, a otros organismos de ámbito internacional, como puede ser el Comité Técnico ISO/TC 274 (Light and Lighting), responsable de la estandarización internacional en el caso de las aplicaciones de iluminación, y cuyo trabajo es complementario al desarrollado por la CIE.
- El comité CEN/TC 169, responsable del desarrollo de esta norma está también involucrado en la elaboración del resto de normas anteriormente citadas, lo que garantiza la congruencia del cuerpo normativo en su conjunto. Consecuentemente, no es previsible que se publique otras normas de obligado cumplimiento que entren en conflicto con la norma UNE-EN 12464-1:2012.

La edad del observador en la norma UNE-EN 12464-1:2012.

La norma UNE-EN 12464-1:2012 especifica, según nos indica el propio texto, los requisitos de iluminación en lugares de trabajo en interiores para satisfacer las necesidades de confort y rendimiento visual de personas con capacidad visual normal. Sin embargo, la definición de la expresión “capacidad visual normal” no está reflejada en ningún punto.

El apartado 4, que establece los criterios de diseño de iluminación resulta también algo ambiguo. Tras establecer los parámetros fundamentales que determinan el ambiente luminoso señala, agrupados en tres epígrafes, otros parámetros ergonómicos visuales que influyen en el rendimiento visual. Estos tres epígrafes hacen referencia a las propiedades intrínsecas de la tarea, la capacidad oftálmica de la persona y el diseño del ambiente luminoso. La capacidad visual se menciona una vez más en el apartado 4.3.3, que establece las iluminancias en el área de la tarea e indica que estos valores deben incrementarse, entre otros supuestos, cuando la capacidad visual del observador está por debajo de los normal; pero una vez más no queda definido que se entiende por “capacidad visual normal”.

3.4.2 La normativa en el ámbito americano

Una mayor sensibilidad a estos factores se pone de manifiesto en las publicaciones y normativas americanas. En este ámbito, la entidad de mayor relevancia en lo referente al cálculo y diseño de iluminación es la IES (Illuminating Engineering Society). Las recomendaciones publicadas por la Illuminating Engineering Society of North America (IESNA) en las ediciones sexta a octava del IESNA Lighting Handbook se basaban en nueve rangos de iluminación caracterizados por letras. El sistema alfabético fue establecido por la IESNA en 1.979. Originalmente se articulaba en nueve niveles desde la A (la iluminancia más baja recomendada) hasta la I (la más alta); por ejemplo, para la categoría E (necesidades para tareas visuales de medio contraste o pequeño tamaño) la recomendación era de 500-750-1000 lx. La ponderación de estos valores se llevaba a cabo en función de distintos parámetros entre los que se encuentran los siguientes:

- La edad media del observador (menor de 40, de 40 a 55, mayor de 55).

- La importancia de la exactitud o la velocidad en la ejecución de la tarea.
- La reflectancia del fondo de la tarea.

Sin embargo, en la novena edición del IESNA Lighting Handbook el sistema de recomendaciones quedó suprimido en relación a la edad, prescindiéndose de la tabla de corrección. De nuevo, encontramos aquí una breve reseña a las condiciones del observador. **El último párrafo de la introducción a la guía de diseño especifica que las condiciones establecidas en esta no han sido desarrolladas en relación a la edad.** En este sentido se apunta que los requerimientos visuales de las personas mayores son significativamente distintos a los de las personas jóvenes:

“Se produce un engrosamiento de la lente amarillenta denominada cristalino que implica una reducción de la cantidad de luz que alcanza la retina, aumenta la dispersión dentro del ojo y se reduce el rango de distancias que pueden ser enfocados de forma correcta (presbicia); asimismo, se produce una disminución del tamaño de la pupila, por lo que también disminuye la cantidad de luz que alcanza la retina”.(...)

(...) “Consecuentemente, las personas mayores requieren mayores niveles de iluminación de la tarea para un mismo estímulo de la retina y, a causa de la disminución de la claridad de las lentes, se reduce la calidad de la imagen. De la misma forma, se ha de prestar una mayor atención a las fuentes de deslumbramiento dentro del campo visual si se trabaja con personas mayores”

IESNA Lighting Handbook, 2001

Las recomendaciones en función de la edad han sido de nuevo retomadas de una forma menos estructurada en la décima edición, que resume la información de las diferentes RP. Para el desarrollo del conocimiento en el ámbito de la iluminación, la IES constituye los Technical Committees of Industry Experts, los cuales se encargan de mantener diferentes tipos de publicaciones:

- Technical Memoranda (TM)
- Recommended Practice (RP)
- Design Guide (DG)
- Lighting Energy Management (LEM)
- Lighting Measurement Testing and Calculation Guides (LM)

Resultan de especial interés los documentos de tipo “recomendaciones prácticas” (RP), puesto que alguno de ellos se traspone de forma directa al ámbito normativo. Tal es caso del documento RP-1-12 centrado en el diseño de iluminación de oficinas que, en su versión de 2012, ha sido adoptado como norma en Estados Unidos por el American National Standard Institute (ANSI) bajo la denominación *ANSI/IES RP-1-12 American National Standard Practice for Office Lighting*.

De forma general, los niveles de iluminación recomendados por los diversos documentos RP, están referenciados a una tabla única que cataloga 25 situaciones en función de las características de las tareas. Estas tablas hacen referencia a la edad de los observadores, si bien los rangos considerados son excesivamente amplios y las variaciones de iluminancia propuestas demasiado generales. El rango de edad central de edad recogido por la norma abarca desde los 25 hasta los 65 años. A partir de estos niveles de iluminación se articulan las

recomendaciones de los otros dos intervalos de edad: el nivel de iluminación recomendado se reducirá un 50 % si, al menos, la mitad de los observadores son menores de 25 años; y se duplicará si, al menos, la mitad de los observadores tiene más de 65 años. Como puedes observarse se trata de una variación un tanto general, que no menciona la calidad de la luz a utilizar ni la tipología de tarea desempeñada (discriminación cromática, percepción de contornos, visualización de texturas, ...). Asimismo, la estructuración de los grupos por edades resulta un tanto escasa, sobre todo tomando en consideración que la edad laboral para este tipo de tareas oscila entre los 20/ 25 años y los 65/70.

CAPÍTULO 4.

METODOLOGÍA EMPLEADA EN LA INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA EMPLEADA EN LA INVESTIGACIÓN

La primera aproximación al problema se ha llevado a cabo mediante el análisis de los fundamentos que sustentan el sistema fotométrico tal y como hoy lo concebimos. Con este análisis se intenta estimar la idoneidad de la fotometría para representar, de forma coherente, la capacidad visual de las personas. La reflexión sobre diferentes aspectos considerados en el mismo pone de manifiesto limitaciones de la función de sensibilidad que tienen su origen en factores inherentes a su propia naturaleza. Por otra parte, el estudio desarrollado permite establecer los parámetros que presentan una mayor indefinición y que, consecuentemente deben ser acotados o analizados en fases posteriores de esta investigación doctoral.

Partiendo de este estudio, y tomando en consideración aportaciones de diferentes campos, se ha procedido a realizar una valoración de las desviaciones que, en función de la edad, se producen al ponderar la energía emitida por distintas tipologías de fuentes mediante la aplicación de una única función de sensibilidad. En esta valoración se analizan los efectos de la calidad y cantidad de la luz emitida por estas fuentes sobre diferentes grupos poblacionales. Para ello, se ha calculado la relación que se establece entre los espectros de emisión de las fuentes de luz de uso habitual en el ámbito administrativo y la calidad de

la imagen retinal generada para cada rango de edad. Los valores así obtenidos se han comparado con los derivados de la aplicación directa de la función de sensibilidad a los espectros de emisión.

Finalmente, se ha realizado una toma de datos para evaluar la capacidad perceptiva asociada a cada uno de los grupos de edad en función de las características del sistema de iluminación; y corroborar, de forma experimental, las limitaciones propuestas tras la valoración anterior. El diseño de esta toma de datos pretende independizar los aspectos perceptivos y atencionales de otras funciones cognitivas de orden superior. En este sentido, se entiende que estas capacidades (las perceptivas y atencionales) no son elementos de la inteligencia, sino condiciones previas al desarrollo de las funciones propiamente cognitivas (Skékely, 1966).

4.1 Alcance del estudio crítico sobre los fundamentos de la fotometría.

La primera parte del estudio se centra en determinar en qué consiste la sensibilidad espectral, tal y como fue definida por Gibson y Tyndall. Para ello, se han analizado los diversos artículos y tomas de datos que fueron utilizados por los propios autores durante el proceso de elaboración de la propuesta original (Gibson, K.S. y Tyndall, 1923). En el enfoque de este análisis se toma en consideración el contexto científico-cultural en que fueron desarrollados estos experimentos; especialmente en lo que se refiere al ámbito de la psicología de la percepción. La reflexión sobre estos conceptos permite hacer una valoración previa de la validez de la función propuesta para los diferentes procesos perceptivos. Se incluye asimismo un análisis de las dos técnicas empleadas (fotometría de parpadeo y equivalencia de brillo); así como un estudio de otras metodologías de la época que fueron descartadas durante el proceso de confección de la función de visibilidad relativa.

Tras este primer acercamiento, se realiza una revisión de las condiciones en que se desarrollaron las tomas de datos, conforme a las indicaciones de los propios autores; comparando estas con las condiciones en que se llevan a cabo los procesos visuales cotidianos. El análisis de estos parámetros permite plantear una cierta falta de correspondencia entre la función de visibilidad teórica y los procesos visuales que tienen lugar en situaciones cotidianas del ámbito estudiado. Se incluye, en esta parte, una valoración de las limitaciones impuestas al sistema visual desde una doble perspectiva; por una parte, tomando en consideración las limitaciones metodológicas establecidas por los propios autores; y, por otra, incluyendo algunas consideraciones posteriores en relación a limitaciones impuestas por los dispositivos ópticos empleados.

Una última reflexión sobre la metodología original permite poner en duda la capacidad de la función de eficiencia luminosa para caracterizar la situación visual en que son desarrollados los procesos, tanto desde un punto de vista perceptivo como desde un punto de vista cognitivo.

4.2 Pre-valoración de la calidad cromática y la iluminancia óptimas.

Una vez acotados los principales parámetros a considerar en nuestro estudio, se ha procedido a estimar la incidencia de diferentes factores sobre la formación de la imagen retinal. En este análisis, realizado desde una perspectiva pluridisciplinar, se ha partido de datos extraídos de investigaciones existentes publicadas en diferentes áreas de conocimiento. Para llevar a cabo la valoración, se han cruzado los datos de emisión espectral de las fuentes luminosas empleadas en el ámbito administrativo, con diferentes parámetros relacionados con la calidad óptica del sistema visual. De esta forma, es posible cuantificar la calidad de la imagen visual formada en la retina del observador; imagen sobre la que se asienta la fase perceptiva del proceso visual.

En consonancia con lo prescrito en la mayor parte de los proyectos de oficinas que se ejecutan en la actualidad, los manantiales luminosos empleados para esta valoración son de tipo led. Existen diferentes tecnologías para la fabricación de ledes de luz blanca; pero los empleados para la iluminación interior presentan unas características de emisión bastante homogénea. Se trata de dispositivos led de emisión azul¹ revestidos por una capa de fósforos que, al ser excitados, producen luz en un amplio rango del espectro. La luz de los fósforos se combina con la generada por el propio led dando lugar a una emisión de luz blanca de amplio espectro. La proporción de energía emitida en las diferentes longitudes de onda varía en función del espesor y el tipo de fósforos empleados en el proceso de fabricación. De esta forma, es posible obtener diferentes calidades de la emisión. Sin embargo, frente a las lámparas fluorescentes, que presentaban una mayor diversidad de distribuciones espectrales; el empleo de una tecnología compartida confiere a los ledes de igual temperatura de color una emisión bastante similar, independientemente de su procedencia² (figura 14).

Figura 14. Curva de emisión de dos fuentes led con temperatura de color 5000 K (CRI>80) procedentes de Samsung (LM561 B plus) y Nichia Corporation (STS-DA7-16045).

¹ La concesión, en 2014, del premio Nobel de física a los creadores del led azul (Isamu Akasaki, Hiroshi Amano y Shuji Nakamura) puede dar idea de la importancia de la tecnología creada.

² Existen, por descontado, dispositivos led con calidades de emisión muy diversas. Esta afirmación está referida a ledes de alta intensidad de luz blanca producidos por empresas reconocidas en el sector de la iluminación con garantías de trazabilidad (Samsung, Cree, Osram, Nichia Corporation, ...)

En las curvas producidas por este tipo de fuentes puede apreciarse un pico de emisión en la región azul del espectro, que se identifica con la radiación del propio led. Este, es un dispositivo fabricado con una aleación de nitruro de indio (InN) y nitruro de Galio (GaN) cuya longitud de onda de emisión puede variar en función de la proporción de los compuestos que la integran. Así, un porcentaje del 98 % de InN genera una emisión en el ultravioleta cercano, en tanto el GaN presenta su máximo en 525 nm. La proporción óptima de los dos compuestos está condicionada por la curva de excitación del material fotoluminiscente empleado, así como por la necesidad de minimizar la emisión de las radiaciones ultravioletas. Consecuentemente, la aleación utilizada suele contener entre un 30% y un 40% de InN, dando lugar a una distribución espectral que presenta su máxima longitud de onda de emisión entre 440 y 460 nm con escaso o nulo contenido de radiación ultravioleta.

Más allá de la radiación azul del led, y en la zona visible del espectro, se pueden apreciar uno o más intervalos amplios que no presenta transiciones abruptas. Esta emisión es característica de los fósforos que encapsulan el led. Observando más en detalle los espectros de emisión de luz cálida, podemos apreciar que presenta dos zonas diferenciadas: La primera con una emisión máxima en torno a los 540 nm (verde) corresponde al YAG:Ce³⁺; y la segunda, con máximo en 620 nm (rojo) al (Sr,Ca)AlSi₃:Eu²⁺ (figura 15) Al aumentar el espesor de la capa de fósforos se reduce la cantidad de radiación azul en la luz emitida. De esta forma se obtiene una emisión más cálida que puede ser regulada alterando la proporción de los dos fósforos en la mezcla.

Para el desarrollo de este análisis se han tomado en consideración cuatro manantiales luminosos LM561B Plus, fabricados por Samsung, en diferentes temperaturas de color correlacionada y con índice de reproducción cromática superior a 80 (figura 16). Conforme a las prescripciones de la norma UNE-EN-12464-1:2012 todas las fuentes analizadas son válidas para su empleo en uso oficina.

Capítulo 4. Metodología empleada en la investigación

Figura 15. Curva de emisión de un led de con fósforo YAG:Ce³⁺ frente a un led bi-fósforo.

Figura 16. Curvas de emisión relativa cuatro fuentes de diferente temperatura de color.

Tomando como punto de partida las curvas de emisión relativa facilitadas por el fabricante, se ha determinado la cantidad de energía que emitirían en cada longitud de onda cuatro fuentes teóricas de diferente calidad cromática y 1W de radiación total (en intervalos de 10 nm). Tras ello, se ha procedido a valorar los efectos visuales producidos por cada una de las cuatro fuentes desde dos perspectivas diferentes. Por una parte, mediante la aplicación directa de la función de sensibilidad espectral; y, por otra, calculando la cantidad de energía que, en función de la edad, alcanza el plano de la retina para cada una de las fuentes luminosas. La comparación de los resultados obtenidos por las dos vías permite estimar una falta de coherencia en los fundamentos de la fotometría. Para calcular la intensidad de la imagen retinal formada se han realizado diferentes consideraciones:

- En primer lugar, se ha determinado la cantidad de energía que atraviesa la pupila en los diferentes grupos poblacionales y para valores de luminancia congruentes con las normativas. Esta determinación se ha realizado conforme a los diámetros de apertura pupilar indicados por el IES. Dado que se trata de una valoración de carácter geométrico, resulta independiente de la longitud de onda.,
- En segundo lugar, los valores resultantes se han rectificado conforme a la transmitancia de los medios visuales. De esta manera, es posible obtener la cantidad teórica de energía que alcanza el plano de la retina en cada uno de los grupos poblacionales. Para realizar el cálculo previo de las transmitancias se han tomado en consideración los datos publicados por la CIE (CIE, 203:2012), en relación a la transmitancia global por edades.
- Tras ello, se ha procedido a rectificar una vez más los valores conforme a los datos publicados por el IES, en relación a la proporción

entre transmisión global y transmisión difusa para las diferentes longitudes de onda.

Una vez analizada la intensidad de la imagen formada en la retina de los diferentes colectivos, se ha procedido a estimar un posible deterioro en la calidad de la misma, como consecuencia de diferentes procesos físicos intraoculares.

- Por una parte, la radiación incidente que, tras interactuar con los medios internos del ojo, alcanza el plano de la retina de forma adireccional. La radiación así generada es debida a la existencia de partículas de gran tamaño cuya concentración se incrementa con la edad. Debido a la dimensión de estas partículas, este fenómeno es independiente de la longitud de onda.
- Por otra parte, la fotoluminiscencia que se produce en el epitelio pigmentado retinal y el cristalino; que se traduce en una emisión de luz hacia el interior del globo ocular en un proceso que varía con la edad y es dependiente de la longitud de onda.

Como resultado de estos procesos, se forma un velo luminoso superpuesto a la imagen retinal que supone una disminución del contraste y un incremento de la borrosidad. Tampoco en este caso se trata de un fenómeno simple, y el estudio de los medios oculares sugiere dos posibles causas:

4.3 Metodología de la toma de datos.

La estructura del experimento³ está principalmente condicionada por su objetivo, que no es otro que determinar la combinación apropiada de nivel de iluminación y calidad cromática de la luz con la que se optimiza el desarrollo de la fase perceptiva de los procesos visuales en cada grupo de edad. No obstante, con la idea de poder valorar la incidencia de su alteración en investigaciones futuras, se han definido y controlado diversos parámetros de contorno. Es necesario aclarar que el objetivo de la toma de no se concreta en la comparación intergrupo de la capacidad visual, sino en la valoración de las condiciones que permiten optimizar el proceso perceptivo dentro de cada grupo de edad y para cada individuo.

4.3.1 Pruebas realizadas durante la toma de datos.

Como ya se ha indicado, para analizar y valorar la percepción visual, es necesario deslindarla, en la medida de lo posible, de otros subprocesos de carácter cognitivo relacionados con la memoria y el procesamiento de la información; subprocesos que, por otra parte, también podrían estar condicionados por la alteración de las condiciones ambientales. Consecuentemente, la selección de los tipos de test y el diseño de las pruebas a realizar se han centrado en los aspectos perceptivos de la función visual.

En el ámbito de la psicología encontramos diversas pruebas estandarizadas que tratan de evaluar la percepción visual, pero cuya realización está condicionada por el grado de desarrollo de capacidades de otro orden. Es el caso del test de Bender (figura 17) y del test de Beery (figura 18), consistentes en copiar figuras y trazos de complejidad creciente. El empleo de estos test ha sido descartado por que introducen una valoración del desarrollo de las

³ Para el diseño y selección de los tipos de prueba se han tomado en consideración las sugerencias desinteresadas del Dr. Estrada, del departamento de psicología ambiental de la Universidad Nacional Autónoma de México.

habilidades motoras y la integración entre estas y las perceptivas. Por motivos similares ha sido descartado el test de los cubos de Kohs, en el que se evidencia la integración del pensamiento conceptual mediante operaciones de análisis y síntesis. También ha sido necesario descartar las primeras tomas de datos realizadas durante el desarrollo de esta investigación, que estaban basadas en la valoración de la velocidad de lectura de textos sencillos, pero que introducían, en mayor o menor medida, una evaluación de las capacidades cognitivas relacionada con el contenido del texto.

Figura 17. Figuras geométricas del test de percepción visual de Bender.

VMI MODELS

(2,10)	(3,00)	(3,00)	(4,01)	(4,04)	(4,06)	(4,07)	(4,11)	(5,03)
COPIES								
CA: 4,09 RS: 4 AE: 2,11
CA: 5,11 RS: 3 AE: 2,9
CA: 6,07 RS: 7 AE: 3,10

Figura 18. Muestra de resultados de una prueba del test de Beery.

Capítulo 4. Metodología empleada en la investigación

Las aptitudes perceptivas también son valoradas por diferentes test que están orientados a la evaluación de la atención. Como se ha indicado, esta aptitud no es considerada propiamente una función cognitiva sino una condición previa necesaria para el desarrollo de estas. Consecuentemente, este tipo de test parecen adaptarse de forma razonable a los objetivos de investigación. Sin embargo, no todos los estándares de este tipo están orientados al perfil de la población analizada en nuestro estudio; tal es el caso del test de atención A-1 y el test de Cueto, que evalúan las aptitudes perceptivas y de atención en niños de 6 años y en edad preescolar respectivamente. Descartados estos, se han tomado en consideración tres pruebas estandarizadas ampliamente utilizadas para la evaluación de la atención (figura 19):

Figura 19. Pruebas de estandarizadas de percepción/atención valoradas previamente al desarrollo de la toma de datos.

- El test Toulouse-Pieron (figura 20) valora la percepción visual en relación a la fatiga y la concentración en individuos de edad superior a los 17 años. Consiste en discriminar semejanzas y diferencias en relación a dos elementos gráficos de referencia. Fue revisado en 2013 y, en la actualidad consta de 1600 símbolos distribuidos en una matriz de 32x50. El tiempo necesario para realizar el mismo es de 10 minutos.
- El test de caras (figura 21) evalúa la aptitud para percibir semejanzas y diferencias entre diferentes patrones de estimulación. Consiste en determinar un elemento diferente de entre tres de carácter similar. Debido a su aspecto lúdico y al reducido tiempo de realización suele ser bien aceptado en los colectivos de menor edad. Sin embargo, como consecuencia de su duración, no permite valorar la incidencia de la fatiga en el desarrollo de la tarea.
- El test D-2 (figura 22), desarrollado en 1962 por Rolf Brickenmap, permite evaluar diversos aspectos de la atención selectiva y sostenida en individuos y colectivos de entre 19 y 88 años. Consiste en identificar tres variantes de un modelo entre elementos similares. La duración del test es de, aproximadamente, 8-10 minutos. El test está estructurado en 14 filas, estando limitado a 20 segundos el tiempo para terminar cada una. Esta forma de aplicación puede introducir una variable adicional vinculada a la ansiedad, motivo por el cual también se ha descartado, optándose finalmente por la utilización del test Toulouse-Pieron.

TEST DE TOULOUSE PIÉRON

Figura 20. Hoja de trabajo del test Toulouse-Pieron utilizada durante la toma de datos.

Capítulo 4. Metodología empleada en la investigación

N.º 21

CARAS
TEST DE PERCEPCIÓN DE DIFERENCIAS

Apellidos y nombre: Edad: Sexo:
Empresa: Categoría:
Centro de enseñanza: Curso:

INSTRUCCIONES

Observe la siguiente fila de caras. Una de las caras es distinta a las otras. La cara que es distinta está marcada.

¿Ve Ud. el motivo por el cual la cara del medio está marcada? La boca es la parte distinta.

A continuación hay otra fila de caras. Mírelas y marque la que es diferente de las otras.

Deberá haber marcado la última cara.

A continuación encontrará otros dibujos parecidos para practicar. En cada fila de tres figuras, marque la cara que es distinta de las otras.

Cuando se le indique, vuelva la hoja y marque las restantes caras en la misma forma. Trabaje rápidamente, pero trate de no cometer equivocaciones.

ESPERE LA SEÑAL DE COMIENZO

Copyright © 1973 by TEA Ediciones, S.A. - Edita TEA Ediciones, S.A. Frey Bernardino de Sahagún, 14, 28018 MADRID - Prohibida la reproducción total o parcial. Todos los derechos reservados - Esta copiará será impresa en tinta azul. Si se presentan otros en tinta negra, es una reproducción ilegal. En beneficio de la producción y en el agua propia. NO LA UTILICE - Printed in Spain, Impreso en España por Agence Compara, Copenhague, 18 agosto, 1982 MADRID - Depósito Legal M. 23407 - 1973.

Figura 21. Hoja de trabajo del test de caras.

TEST d2

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

MUY IMPORTANTE
POR FAVOR, NO ESCRIBA NADA EN ESTA FRANJA AZUL O PUEDE INVALIDAR SU EJERCICIO

Figura 22. Hoja de trabajo del Test estandarizado D-2.

De forma complementaria, y sobre un número limitado de los individuos de la muestra, se ha utilizado un test no estandarizado que trata de valorar, desde el punto de vista perceptivo y no cognitivo, el desarrollo de las tareas de lectura y escritura. Para ello se ha diseñado una plantilla (figura 23) en la que se disponen un total de 120 series alfanuméricas que han de ser copiadas en la casilla contigua. Cada una de las series está constituida por un total de ocho signos que, en conjunto, carecen de significado. Este punto resulta importante, dado que de otra forma la tarea podría ejecutarse de forma memorística. La escasa longitud de las cadenas alfanuméricas y su presencia visual ordenada tienen como finalidad no introducir otro tipo de variables cognitivas más allá de la identificación de los símbolos y su transcripción sin necesidad de memorizar posiciones intermedias. Como se ha indicado en el estado del arte, la familiarización con los elementos de la tarea es un parámetro importante en relación a los niveles de iluminación necesarios para su desarrollo. Dado que todos los individuos que han realizado la toma de datos pertenecen a un ámbito intelectualmente activo, se puede afirmar están familiarizados con los símbolos empleados, y que, por tanto, no se introducen otros elementos de índole cognitiva en el desarrollo de la toma de datos.

Experimento: 1 2 3			E:	CTT:	L:
Iniciales:		Raza:	Género:		Edad:

Copie las siguientes series gráficas en la casilla adyacente:

t4irnfr0	
j4mcu5he	
2qwe5f01	
ve581drt	
m83rd4sg	
gbc52y8d	
hjf5d13	
t4irnfr0	
rt0j9fr5	
5gde41st	
g5r432dv	
jf012r45	
hrd0a423	
0t4ftef4	
gt04ra2z	
zcdt83d1	
lpi7u9m7	
seqrtcs3	
4tg2a51e	
of41sr0b	
pokl79u7	
de3s4f50	
da2xcv54	
8ugt53v7	
kh09h4q2	
rd5rtv0	
trde42v5	
uhf04d4e	
ghtexh04	
0g7h43w2	

0kf5sef4	
g3wsx3r0	
py2e4r5g	
gtrgf58p	
rkh53fsc	
gjhgb53	
awrtg4d2	
rtd43tfg	
hrt5f53	
tr4e3ds4	
j0f4dr3e	
khfr0d21	
5fd4w3xh	
0tf3ew2v	
ty0ste31	
t0d43etf	
ytewdvte	
t0e3vte5	
0gvr5gs2	
t0cv5gdr	
5rdf5e3e	
tcpl8ju7	
8uhmormu	
9uhtnbky	
uihtnpou	
juim9iu7	
ju8g7u9u	
koinytny	
ki8u7nyt	
oiuy70k0	

Figura 23. Plantilla de copia y escritura diseñado para valorar la capacidad perceptiva.

4.3.2 Características y tamaño de la muestra.

El estudio trata de determinar las características cuantitativas y cualitativas del sistema de iluminación que permiten optimizar el desarrollo de los procesos visuales asociados a las tareas de oficina para los diferentes rangos de edad entre los 20 y los 70 años. Consecuentemente, se han realizado tomas de datos independientes para cada uno de los colectivos objeto de estudio. De entre los posibles colectivos poblacionales de la Universidad Nacional a los que se ha tenido acceso para el desarrollo la toma de datos (alumnos, personal administrativo, ...), se ha seleccionado el personal académico por responder al perfil demográfico estudiado y permitir realizar la división en rangos poblacionales de forma coherente.

La población total estudiada, conforme a los datos estadísticos del 2019 facilitados por la propia universidad, asciende a un total de 44.082 personas de las cuales 2292 no son objeto de este estudio por exceder de 70 años. Con la distribución por edades obtenida de la misma fuente, es posible establecer 5 colectivos poblacionales estructurados por edades para realizar el análisis de cada uno de ellos de forma independiente (figura 24).

Figura 24. Datos estadísticos de la población objeto del estudio (Agenda Estadística, 2019)

Dentro de cada uno de los colectivos se ha realizado una selección por muestreo aleatorio simple asignando un número a cada uno de los individuos y empleando un generador aleatorio de números (figura 25).

Indica el rango para generar los números aleatorios

Inicio:

Final:

Cuántos números:

Números aleatorios: 1925, 9398, 4556,
6534, 4095, 5355,
3346, 170, 5433,
7527, 7318, 2373,
3944

Generar

Figura 25. Imagen tipo del generador aleatorio de números empleado durante el proceso de selección de los observadores.

Tras trabajar con los primeros ocho observadores de cada colectivo se han calculado las varianzas obtenidas y se ha determinado el tamaño de la muestra necesario para cada uno de ellos conforme a la ecuación 6. Las dimensiones de la muestra obtenidas en cada caso, calculadas para un error del 4%. están reflejadas en la tabla 11.

Ecuación 6, Ecuación empleada para la determinación del tamaño de la muestra.

$$n = \frac{N \cdot S^2}{v_0 \cdot N + S^2} = \frac{S^2}{v_0 + \frac{S^2}{N}}$$

Donde:

N es la población total de cada uno de los grupos

V₀ es el error al cuadrado

S² es la varianza calculada mediante el programa Excell 365

Tabla 11. Dimensión de la muestra para cada una de las poblaciones objeto de estudio

Colectivo	%	Población	Varianza	Tamaño de la muestra
20-29	8,4	3703 personas	0,0135476	8,44 (9 personas)
30-39	19,8	8728 personas	0,0165765	10,34 (11 personas)
40-49	25,1	11065 personas	0,0205403	12,82 (13 personas)
50-59	24,2	10668 personas	0,0240985	15,04 (16 personas)
60-69	17,3	7626 personas	0,0300453	18,73 (19 personas)

Con el objeto de abarcar una mayor combinación de niveles de iluminación y temperaturas de color durante el desarrollo de la toma de datos, los observadores de cada colectivo se han separado en dos secciones (tabla 12). Por otra parte, cada una de las secciones se han organizado en grupos de trabajo reducidos y heterogéneos para evitar que las condiciones específicas (ruido, confusión, etc.) en que se desarrolla cada toma de datos puedan afectar a uno de los colectivos en concreto (tabla 13 y tabla 14).

Ninguno de los individuos seleccionados en el muestreo aleatorio inicial presentaba patologías visuales significativas; sin embargo, uno de los individuos seleccionado presentaba una alteración visual cromática (daltonismo-protanopia). Este individuo fue descartado⁴ de la toma de datos y sustituido por otro elegido al azar mediante la misma técnica. Asimismo, del total de individuos seleccionados inicialmente, un 10% no pudo realizar la toma de datos por motivos personales. Consecuentemente, estos individuos fueron sustituidos mediante la generación aleatoria de nuevos números.

⁴ Los individuos con alteraciones cromáticas del sistema visual no responden a la función de sensibilidad objeto de estudio.

Tabla 12. Estructura de la muestra poblacional articulada en secciones.

Edad	Sección 1	Sección 2	Total
20-29	5 observadores	4 observadores	9 observadores
30-39	5 observadores	6 observadores	11 observadores
40-49	7 observadores	6 observadores	13 observadores
50-59	8 observadores	8 observadores	16 observadores
60-69	9 observadores	10 observadores	19 observadores
	34 observadores	34 observadores	68 observadores

Tabla 13. Distribución de sección 1 de la muestra en grupos de trabajos reducidos.

Edad	Sección 1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7
20-29	5 observadores	1	1	1	1	1	-	-
30-39	5 observadores	1	1	1	1	1	-	-
40-49	7 observadores	1	1	1	1	1	1	1
50-59	8 observadores	1	1	1	1	1	2	1
60-69	9 observadores	1	1	1	1	1	2	2
Total	34 observadores	5	5	5	5	5	5	4

Tabla 14. Distribución de la sección 2 de la muestra en grupos de trabajo reducidos.

Edad	Sección 2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7
20-29	4 observadores	1	1	1	1	-	-	-
30-39	6 observadores	1	1	1	1	1	1	-
40-49	6 observadores	1	1	1	1	1	-	1
50-59	8 observadores	1	1	1	1	1	2	1
60-69	10 observadores	1	1	1	1	2	2	2
Total	34 observadores	5	5	5	5	5	5	4

4.3.3 Espacio de trabajo de la toma de datos.

La toma de datos se ha llevado a cabo en los espacios dispuestos a tal efecto en las instalaciones de posgrado de la universidad. Con el objeto de adaptarlo a las condiciones requeridas para el correcto desarrollo de los experimentos, el espacio disponible se ha dividido en dos zonas (figura 26), empleando para ello módulos de estanterías de color gris oscuro con coeficiente de reflexión 0,5. De esta forma, la sala ha quedado dividida en una zona de trabajo, donde se llevan a cabo las pruebas; y una zona de descanso.

Para mantener bajo control las luminancias de ambas zonas se ha procedido a apantallar las ventanas interponiendo una estantería de características cromáticas similares a las anteriores. De la misma forma, se ha suprimido el sistema de iluminación general directa existente, utilizando en su lugar una fuente de luz indirecta de flujo regulable que permite mantener las luminancias de los paramentos en valores inferiores a los empleados durante la realización de los test. El empleo de luminancias inferiores responde a que los tiempos de adaptación necesarios son mucho menores al aumentar las luminancias que al disminuirlas.

La zona de trabajo dispone de dos tipos de puestos que, inicialmente, presentaban características cromáticas diferentes. Para garantizar un control apropiado sobre las condiciones de luminancia se han rectificado las mismas revistiendo las superficies visibles con elementos de reflectancia conocida (figura 27). Asimismo, se ha verificado que las fuentes luminosas están correctamente apantalladas y no son visibles desde la posición de trabajo, evitando de esta forma introducir posibles problemas de deslumbramiento durante el desarrollo de la toma de datos.

Capítulo 4. Metodología empleada en la investigación

Figura 26. Descripción gráfica de la sala de trabajo.

Figura 27. Tratamiento de los puestos de trabajo y los paramentos para unificar las condiciones de luminancia en las que se desarrolla la toma de datos.

4.3.4 Material empleado durante la toma de datos

Las fuentes luminosas empleadas en la toma de datos son módulos lineales, de 560 mm de longitud, comercializados por Samsung bajo la denominación LT-M562C-G2 (figura 28). Estos módulos están equipados con emisores LM 561B+, cuyas características cromáticas han sido discutidas en el capítulo dedicado a metodología⁵. La disposición de las mismas a 45 cm de altura sobre el plano de trabajo permite alcanzar niveles de iluminación muy superiores a los requeridos para este estudio. Por otra parte, la emisión combinada del conjunto de ledes produce una luz poco direccional que minimiza posibles problemas relacionados con la generación de sombras.

Figura 28. Características geométricas de los módulos empleados en la toma de datos extraída de la documentación comercial.

⁵ Cabe destacar que estos módulos no se comercializan en temperatura de color correlacionada de 6500 K, por lo que ha sido necesario realizar el reemplazamiento de los ledes en los laboratorios de la Universidad.

Capítulo 4. Metodología empleada en la investigación

Para verificar las condiciones de iluminación bajo las que se han llevado a cabo los test se ha empleado el siguiente material (figura 29): un luminancímetro Minolta LS160 calibrado (Num. Serie: D20001210), con las características especificadas en la tabla 15; un colorímetro Kónica Minolta CL200A calibrado, con las características indicadas en la tabla 16; y un luxómetro Kónica-Minolta T10-MA calibrado, con las características indicadas en la tabla 17.

Figura 29. Dispositivos de medición empleados durante el desarrollo de la toma de datos.

Tabla 15. Especificaciones técnicas del luminancímetro empleado.

Num. Serie: D20001210	Medidor de Luminancia LS-160
Ángulo de Medición	1/3°
Sistema Óptico	Sistema de visión SLR, f = 85 mm F2.8
Ángulo de Visión	9° (con ajuste de dioptrías)
Respuesta Espectral Relativa	Iguala cercanamente la eficiencia luminosa espectral (V (λ))
Área de Medición Mínima (diámetro)	4.5 mm (0.4 mm con lente de acercamiento)
Modo de Medición	Valores instantáneos, valor máximo/mínimo, diferencia de luminancia (Δ)/radio de luminancia (%)
Tiempo de Medición	AUTO: 0.7 to 4.3 segundos Manual: 0.7 to 7.1 segundos
Unidad de Luminancia	cd/m ² or fL
Rango de Luminancia	0.01 to 9,999,000 cd/m ²
Precisión *1	+/-2% +/- 2 dígitos (10 cd/m ² o menor) +/-2% +/- 1 dígito (10 cd/m ² o mayor)

Tabla 16. Especificaciones técnicas del colorímetro empleado durante la toma de datos.

Num. Serie: 20028703	Medidor cromático de iluminación CI-200a
Respuesta espectral relativa	Coincide de forma precisa con las curvas de observador estándar CIE $X(\lambda)$, $y(\lambda)$ y $Z(\lambda)$ Dentro de 6% (f_1') de la eficiencia espectral luminosa CIE $V(\lambda)$
Respuesta cosenoidal (f_2)	Ev: dentro de 3%
Receptor	Fotocelda de silicio
Función de medición	Valores triestímulo: XYZ
	Cromaticidad: Ev_{xy} , $E_{vu'v'}$
	Temperatura de color correlacionada: Ev, T_{cp} , Δ_{uv}
	Diferencia de color: $\Delta(XYZ)$, $\Delta(Ev, xy)$, $\Delta(E_{vu'v'})$, ΔE_{uv} , $\Delta u'v'$
Rango de medición	0.1~99 990 lx, 0.01~9999 fcd (cromaticidad: 5 lx, 0.5 fcd o mayor) en cuatro rangos seleccionados automáticamente (lx o fcd seleccionable)
Exactitud	Ev: $\pm 2\% \pm 1$ dígito del valor indicado
	xy: ± 0.002 (800 lx, medición de iluminante estándar A)
Repetitividad	Ev: $0.5\% + 1$ dígito (2σ)
	xy: ± 0.0005
Desviación por efectos de temperatura	Ev: $\pm 3\% \pm 1$ dígito del valor indicado,
	xy: ± 0.003
Desviación por efectos de humedad	Ev: $\pm 3\% \pm 1$ dígito del valor indicado,
	xy: ± 0.003
Tiempo de respuesta	0.5 s (medición continua)

Tabla 17. Especificaciones técnicas del luxómetro empleado durante la toma de datos.

Num. Serie: 27345766	Luxómetro T-10MA (Mini receptor head)
Tipo	Medidor de iluminancia digital multifunción con cabezal receptor desmontable (mediciones multipunto de 2 a 30 puntos)
Clase de medidor de iluminancia	Conforme a los requisitos para Clase AA de JIS C 1609-1: 2006 "Medidores de iluminancia Parte 1: Instrumentos de medición general". Conforme a DIN 5032 Parte 7 Clase B.
Receptor	Fotocélula de silicio
Respuesta espectral relativa	Dentro de 6% (f_1') de la eficiencia espectral luminosa CIE $V(\lambda)$
Respuesta cosenoidal	Dentro de 3%
Rango de medición	0.01 a 299 900 lx, 0.001 a 29 990 ft-c Autorrango (5 rangos manuales con salida analógica)
Función de medición	Iluminancia (lx), diferencia de iluminancias (lx), relación de iluminancias (%), iluminancia integrada (lx*h), tiempo de integración (h), iluminancia promedio (lx)
Iluminancia integrada	0.01 a 999 900 $\times 10^3$ lx*h 0.001 a 99 990 $\times 10^3$ ft-c*h / 0.001 a 9999 h
Linealidad	$\pm 2\% \pm 1$ dígito del valor indicado
Desviación por efectos de temperatura/humedad	Dentro de $\pm 3\%$

4.3.5 Parámetros de contorno controlados en la toma de datos

La dimensión de los símbolos impresos (0,4 cm) en relación a la distancia de trabajo (entre 20 y 40 cm) generan un ángulo visual subtendido de aproximadamente 2°. En estas condiciones, la imagen retinal se genera en la fovea, por lo que es posible afirmar que la tarea responde a las condiciones de sensibilidad fotópica analizada en nuestro estudio.

Los niveles de iluminación nominales de cada prueba corresponden a la media de tres mediciones realizadas en el área central del plano de trabajo (figura 30). Como consecuencia del sistema de iluminación empleado la uniformidad obtenida en esta área resulta muy elevada, obteniéndose valores superiores a 0,9 en todos los casos⁶. En relación al entorno visual generado alrededor del área de trabajo se han realizado las siguientes consideraciones (figura 31):

- La superficie de la mesa ha sido revestida, en tono gris, para obtener un coeficiente de reflexión difusa, ligeramente inferior al del papel, de 0,6.
- La superficie de la pared ubicada frente al observador ha sido tratada del mismo modo, conforme a las especificaciones de la norma UNE-EN-12464-1:2012 (figura 32).
- Para evitar una luminancia excesiva en el plano vertical, se ha procedido a apantallar la emisión de las fuentes luminosas en dirección a la pared disponiendo para ello un perfil angular.

⁶ La uniformidad ha sido calculada, conforme a las indicaciones de la norma UNE-12665, como el cociente entre la iluminancia mínima y la iluminancia media.

- Se he verificado que, desde las diferentes posiciones de trabajo adoptadas por los observadores, el apantallamiento frontal garantiza que no se produce deslumbramiento directo.
- Los niveles de iluminación del resto de paramentos se han mantenido, conforme a las recomendaciones de la citada norma, en valores medios de 50 lx. El sistema de iluminación empleado para ello ha facilitado uniformidades superiores a las exigidas. Asimismo, las reflectancias de paredes y techos (0,6 y 0,7 respectivamente) respetan los límites establecidos en el mismo texto.

Figura 30. Zona de medición de los niveles de iluminación para el plano de trabajo.

Figura 31. Luminancias (cd/m^2) medidas antes (izquierda) y después (derecha) de modificar las características superficiales del paramento vertical

Figura 32. Valores de luminancia (cd/m^2) obtenidos durante una de las sesiones.

4.3.6 Otros aspectos relativos al observador considerados.

El orden de ejecución de los test se ha modificado en cada uno de los grupos para acotar posibles desviaciones relacionadas con aspectos fisiológicos y psicológicos que podrían afectar a los resultados obtenidos en los mismos.

Durante la primera fase de la toma de datos se ha trabajado con 8 grupos de trabajo en los cuales había un representante de cada colectivo de edad. Cada grupo ha llevado a cabo un total de 24 test, distribuidos en 4 sesiones. Cada serie de 6 test se ha ejecutado manteniendo las condiciones cromáticas de la fuente y modificando los niveles de iluminación (tabla 18). Para evitar desviaciones de los datos obtenidos como consecuencia de la fatiga del observador durante la sesión, el incremento de concentración a lo largo de la misma, o la progresiva familiarización del observador con el test; se ha procedido a realizar la mitad de las series variando el nivel de iluminación de forma

creciente y la otra mitad de forma decreciente. Igualmente, la ejecución de las cual el orden de las sesiones ha sido alterado en los diferentes grupos de trabajo estableciendo un orden de trabajo específico para cada grupo (tabla 18).

Con los datos obtenidos en la primera fase se ha determinado la varianza de la muestra y; tomando esta como punto de partida, el número de observaciones necesarias para cada colectivo. Tras completar las 4 primeras sesiones con el conjunto total de observadores, se ha procedido a realizar una segunda fase, consistente en cinco sesiones de cinco test. En cada una de estas sesiones se ha mantenido fijo el nivel de iluminación alterando la temperatura de color.

Tabla 18. Esquema de distribución de sesiones de trabajo de un grupo del colectivo 1.

E (lx) TCC (K)	Ref.	150	300	500	1000	2000	Ref.	
Ref.								
3000								Sesión-3
4000								Sesión-4
5000								Sesión-1
6500								Sesión-2
Ref								
		S-5	S-6	S-7	S-8	S-9

CAPÍTULO 5.

ANÁLISIS CRÍTICO DE LA FUNCIÓN DE SENSIBILIDAD ESPECTRAL

CAPÍTULO 5. ESTUDIO CRÍTICO DE LA FUNCIÓN DE SENSIBILIDAD.

El análisis de la metodología empleada para el desarrollo de la función de visibilidad relativa, hoy conocida como función de sensibilidad espectral, permite establecer diversos factores, relacionados con las condiciones de contorno y con las singularidades del individuo, que no están siendo valorados por dicha función. La idea que subyace bajo este análisis es que la función desarrollada por Gibson y Tyndall sólo debería ser aplicada de forma directa a situaciones contextuales, incluyendo las referentes al observador, semejantes a las empleadas en el proceso de elaboración de la propia función; en tanto que, otras condiciones de trabajo requieren de factores de corrección o recomendaciones complementarias para el correcto desarrollo de los procesos perceptivos visuales.

5.1 Análisis de los métodos empleados para elaborar la función.

La función de sensibilidad espectral planteada por Gibson y Tyndall se sustenta sobre un conjunto de investigaciones publicadas, mayoritariamente Estados Unidos, entre 1912 y 1923. Estos trabajos, que presentan cierta

uniformidad metodológica, tratan de estimar la visibilidad de las diferentes longitudes de onda mediante las dos técnicas propuestas por Coblentz y Emmerson: la identificación directa de brillo (direct match brightness) y la fotometría de parpadeo (flicker photometry) (Coblentz, W.W. y Emerson, W.B., 1917). En ambos casos, la sensibilidad espectral del ojo humano queda definida conforme a la equivalencia del efecto visual de percepción de brillo.

- La primera técnica¹ (Equality of brightness) asume que la observación de dos campos visuales; de similar dimensión, radiancia y longitud de onda; presentados a un observador durante el mismo intervalo de tiempo, generan la misma sensación visual. Al modificar la longitud de onda de uno de los campos la sensación perceptiva varía en color y brillo. En esta situación, es posible igualar la sensación de brillo de ambos campos variando únicamente la radiancia de uno de ellos. Esta propiedad permite establecer la relación de sensibilidad relativa entre ambas emisiones. Realizando esta operación en todos los intervalos del espectro cabe determinar la curva de eficiencia luminosa referenciada a una longitud de onda arbitraria. Habitualmente, la longitud de onda elegida es aquella a la que el sistema visual humano presenta la máxima sensibilidad (Boyce, P.R., 2014).

Conforme a las apreciaciones de Coblentz y Emmerson, la dificultad de este método se encuentra en la incapacidad de muchos observadores para emitir un juicio en presencia de campos con diferencias de tonalidad significativas (figura 33). Consecuentemente, la toma de datos ha de realizarse por intervalos; mediante la comparación sucesiva de longitudes de onda próximas (Step by Step).

¹ Esta metodología fue empleada por diferentes investigadores, con pequeñas variaciones y bajo diversas denominaciones, tales como Direct Match Brightness (igualación directa del brillo) ó Minimal boundary distinction (Distinción mínima del borde). En la actualidad sigue siendo utilizada con algunas modificaciones (Sagawa y Takahasi, 2001).

El dispositivo utilizado por Gibson y Tyndall para generar los estímulos luminosos consistía en una caja, esmaltada internamente con óxido de magnesio, que presentaba tres aberturas de salida para la luz: dos de ellas permitían realizar la comparación visual, y una tercera se empleaba para efectuar la valoración energética (figura 34). El equipo estaba equipado internamente con ocho lámparas incandescentes de 600 W que se iban encendiendo progresivamente para mantener los niveles de luminancia en la región fotópica (a medida que la toma de datos se alejaba de la región de máxima sensibilidad). Sin embargo, los autores de la toma de datos cuestionaron que, aun haciendo funcionar las ocho lámparas, el nivel de luminancia generado correspondiera a valores fotópicos para las longitudes de onda ubicadas en los extremos del espectro visual. Por otra parte, los saltos cuantitativos producidos por el encendido sucesivo de las fuentes luminosas suponen la introducción de alteraciones cuyos efectos resultan difíciles de evaluar. Hasta cierto punto, estos efectos fueron integrados por los propios autores en la valoración del error global acumulado, próximo al 5% en su conjunto.

Figura 33. Formato del campo visual empleado por Gibson y Tyndall. La equiparación de sensaciones de brillo resulta compleja si existen diferencias de tonalidad significativas.

Figura 34. Dispositivo experimental diseñado por Gibson y Tyndal para su toma de datos por identificación directa de brillo, con indicación de las características del campo visual observado.

- En la fotometría de parpadeo (Flicker photometry) los dos campos se visualizan de forma alternativa en una misma posición. A determinada frecuencia, la sensación cromática se unifica dando lugar a un color único con un parpadeo de brillo superpuesto (figura 35). En estas

condiciones, se puede alterar la intensidad relativa de los dos campos para obtener una sensación visual constante en todos sus aspectos. La idea que subyace bajo esta metodología es que el parpadeo de color tiene una frecuencia crítica menor que el parpadeo de brillo; por lo que, alcanzada la primera frecuencia, es posible llevar a cabo la comparación de la segunda.

Figura 35. En la fotometría de parpadeo (Flicker photometry) dos campos visuales de diferente tonalidad se alternan en una misma posición para valorar la equivalencia de brillo.

Resulta interesante, asimismo, analizar otras metodologías de obtención de datos contemporáneas a las que acabamos de definir. De entre las numerosas técnicas recogidas en la literatura científica de la época cabe destacar el método del umbral de visión, el de la frecuencia crítica y el de la agudeza visual; por ser las más utilizadas² durante el periodo previo a la publicación de Gibson y Tyndall.

- El método del umbral de visión (Threshold of Vision): Utilizado con anterioridad en múltiples investigaciones (Ebert, König y Dieterici,

² Tal y como se ha visto en la introducción, tras la constatación de la naturaleza energética de la luz por parte de Maxwell y Hertz, se inició un periodo de evolución en el cual se acomete el estudio de las magnitudes luminosas desde diversas perspectivas. Una primera aproximación a los trabajos desarrollados en este periodo (1887-1923) permite clasificar las publicaciones en dos grandes grupos: aquellas que toman en consideración la sensibilidad espectral del ojo humano y los que analizan la radiación visible, de forma global, independientemente de su capacidad de estimular el sistema visual. El presente documento se centra exclusivamente en los primeros, habida cuenta de que el concepto de sensibilidad resulta indiscutible desde una perspectiva actual.

Pflüger, ...) permitía cuantificar la cantidad mínima de energía que se requiere, para producir sensación de luz, en las diferentes regiones del espectro. Los resultados permitieron valorar a estos investigadores que, para bajas intensidades la máxima sensibilidad oscilaba entre los 490 nm y los 530 nm. Sin embargo, Coblentz y Emerson desaconsejan el empleo de esta metodología por dos motivos: en primer lugar, porque conduce a fuertes desviaciones en los datos obtenidos con diferentes observadores; y, en segundo lugar, porque emplea unos niveles de iluminación poco útiles en la práctica diaria. Desde la perspectiva actual la exclusión de estos trabajos resulta razonable; dado que con estos niveles se desplaza el estudio de la visibilidad a un rango de luminancias escotópico, y resultan por ello de poco interés para su aplicación en el campo de la arquitectura.

- El método de la frecuencia crítica (Critical frequency), también utilizado bajo la denominación “persistence of vision”, consiste en variar la velocidad de rotación de un disco sectorizado sobre un determinado estímulo lumínico hasta hacer desaparecer la sensación de parpadeo. Con este procedimiento se obtiene el tiempo de persistencia de la imagen sobre la retina. El fundamento de este método, según justificaban sus defensores, reside en la idea de que dos sensaciones lumínicas con la misma frecuencia crítica tienen la misma luminancia. Resulta, sin embargo, bastante similar a la fotometría de parpadeo, habiendo sido considerado en su momento como una variación del mismo.
- Por último, en el método de la agudeza visual (Visual acuity) la visibilidad relativa de cada longitud de onda quedaba definida mediante la energía radiante que hacía falta para llevar a cabo una determinada tarea. Langley, por ejemplo, había determinado la

cantidad de luz de diferentes longitudes de onda que era necesaria para distinguir una tabla de logaritmos con características tipográficas definidas. Este método fue descartado por la existencia de múltiples variables que, al ser modificadas, hacían variar sustancialmente los resultados.

Como puede apreciarse, con la excepción del método de la agudeza visual, que está basado en procesos perceptivos desarrollados en condiciones ambientales, los experimentos que acabamos de mencionar responden a estímulos minuciosamente acotados, conforme los principios establecidos por la psicofísica³, disciplina científica que se había consolidado durante la segunda mitad del siglo XIX. Según las diversas formulaciones de su teoría clásica, la investigación de los procesos perceptivos ha de comenzar dividiendo cada modalidad sensorial en diferentes sensaciones elementales para, posteriormente, analizar la percepción como una síntesis de estas. Todos los estudios considerados por Gibson y Tyndall en la elaboración de su propuesta están realizados en unas condiciones de laboratorio detalladamente definidas, que producen sensaciones similares a las descritas por Helmholtz, Wünder o Titchener en sus textos. Las dos metodologías empleadas fueron diseñadas para aislar la sensación elemental de brillo mediante una escrupulosa acotación de los estímulos (dimensión y luminancias del campo visual, duración, condiciones lumínicas del entorno periférico, ...).

Dado que la definición de un sistema métrico requiere de un exhaustivo rigor metodológico; este control detallado fue entendido por los físicos como una necesidad imperativa para el desarrollo de la fotometría. Consecuentemente, se

³ Rama de la física, consolidada en la segunda mitad del siglo XIX, que se centra en establecer relaciones matemáticas precisas entre los estímulos físicos y las sensaciones que generan. En lo referente a la percepción visual, tienen especial interés los estudios de Hermann von Helmholtz (Helmholtz, H, 1856) que, junto a las reelaboraciones de sus ideas publicadas por Wilhem Wundt (Wünder, 1874) y Edwar Titchener (Titchener, E., 1901), constituyen la denominada Teoría Clásica; de obligada referencia en cualquier estudio sobre percepción.

decidió excluir del proceso de elaboración de la función de sensibilidad aquellos experimentos basados en situaciones ambientales, tal es el caso del método de la agudeza visual. Sin embargo, conviene tener presente que los procesos visuales revisten un carácter complejo; en tanto que el sistema ideado para su cuantificación los simplifica, tal vez en exceso, reduciéndolos exclusivamente a la comparación de brillos.

Resulta interesante observar que, en paralelo al proceso de definición de la fotometría, comenzaron a tomar forma otras alternativas teóricas que planteaban un reto global a las posturas defendidas por las teorías clásicas (Luna, D.; Tudela, P. 2006). En este sentido, se puede apreciar una fuerte discrepancia entre las especulaciones psicofísicas sobre las que sustenta la función de sensibilidad espectral y las reflexiones aportadas por otras teorías de la percepción que, con la Gestalt a la cabeza, comenzaron a consolidarse a principios del siglo XX. Para Wertheimer, Köhler y Kofka⁴, entender la percepción como el resultado de sensaciones simples resultaba artificioso; por lo que daban más importancia a la configuración estructural del campo perceptivo.

Como se ha indicado, el esquema de trabajo seguido para determinar la función de sensibilidad espectral parece más acorde a los postulados de la Teoría Clásica que a la valoración de situaciones perceptivas globales propuesta por la Gestalt. Frente a estos nuevos planteamientos, Gibson y Tyndall argumentaron que la definición detallada de las condiciones experimentales era indispensable para evitar una excesiva dispersión de las curvas de sensibilidad

⁴ Max Wertheimer, Wolfgang Köhler y Kurt Kofka encabezaron una corriente de la psicología moderna (la Gestalt) que se oponía a los principios propuestos por la Teoría Clásica. Para estos autores, pensar en la percepción como el resultado de la adición de sensaciones constituye una simplificación artificiosa de un proceso mucho más complejo. En contraposición, la Teoría de la Gestalt plantea la necesidad de tomar en consideración la forma en que se relacionan los elementos que componen la escena, y la totalidad estructurada por esas relaciones (Luna, D.; Tudela, P. 2006).

individuales, así como para compatibilizar los resultados de las dos metodologías empleadas.

Como contrapartida, las restricciones impuestas a los estímulos limitan la universalidad de las técnicas fotométricas; es decir, si la alteración de las condiciones en que se lleva a cabo la toma de datos conduce a la modificación de la curva de sensibilidad obtenida, deberían establecerse funciones de sensibilidad específicas para cada posible situación perceptiva. Aceptar estas restricciones implica asumir que, si el proceso visual se desarrolla en circunstancias diferentes a las dispuestas en el proceso de determinación de la función, no puede ser estrictamente valorado conforme a esta. Este modelo de razonamiento es recurrente: Por una parte, la inexistencia de un sistema fotométrico universal imposibilita la cuantificación de los procesos visuales; por otra, cualquier sistema fotométrico queda automáticamente invalidado como consecuencia de la inconstancia con que se desarrollan esos mismos procesos. Para elaborar un sistema de medición resulta, por tanto, indispensable romper con esta argumentación y, consecuentemente, renunciar desde el principio al carácter universal del mismo.

Así pues, parece razonable adoptar la función de sensibilidad concebida por Gibson y Tyndall para, posteriormente, definir parámetros que permitan adaptarla a otras situaciones perceptivas. Sin embargo, muchos trabajos de investigación se desarrollan empleando estas técnicas fotométricas sin valorar su validez para las condiciones de trabajo específicas. De esta forma, se asume la universalidad de la fotometría independientemente de las condiciones de contorno en que se desarrolla el proceso visual. Así, por ejemplo, en el campo de la psicología de la percepción, podemos encontrar numerosos estudios que tratan de cuantificar la incidencia de factores ambientales y poblacionales en los procesos perceptivos; pero, en el mejor de los casos, llevan a cabo esta cuantificación conforme a la curva definida en 1923, sin tomar en consideración

la validez de la función de sensibilidad para la situación perceptiva generada. Como se ha indicado, la definición del sistema fotométrico ha requerido de un profundo rigor metodológico que puede conducir a valores no representativos de la percepción visual en algunas situaciones reales. Resulta, por tanto, indispensable tomar en consideración las múltiples variables de contorno que intervienen en el proceso visual y valorar la utilidad de las técnicas fotométricas para proceder a la elaboración de recomendaciones y normativas específicas referentes a cada uno de los escenarios posibles. A pesar de ser necesaria, la minuciosa acotación del estímulo limita, en cierto grado, la utilidad práctica de la fotometría, puesto que las condiciones de trabajo del sistema visual en situaciones reales pueden diferir sensiblemente de las establecidas para la elaboración de la función de sensibilidad espectral.

De forma específica, estas limitaciones deberían tenerse presentes en el momento de valorar los requisitos de iluminación necesarios para colectivos de diferentes características, tal es el caso de la edad, tratando establecer los parámetros necesarios para su corrección y de determinar otros aspectos que, como se ha indicado, no pueden ser cuantificados mediante la función de sensibilidad.

Como se ha indicado, muchas de las variables ambientales presentes en el método de la agudeza visual, quedaron restringidas en la metodología de elaboración de la función de sensibilidad. Las restricciones impuestas en este proceso implican la supresión de factores intrínsecos a los procesos perceptivos que permiten cuestionar la universalidad de la curva. En este sentido, el método de la agudeza visual, tal y como fue planteado por Langley, está basado en el desarrollo de una tarea real que deja abierta la posibilidad de alterar y analizar las condiciones de contorno en que se desarrolla el proceso perceptivo. Así, por ejemplo, en la elección de la tarea (lectura) está implícita la acotación de algunos aspectos, tales como la tipología funcional de la tarea (identificación de

contornos con alto contraste)⁵; la amplitud del campo visual (visión foveal); el contraste cromático (tarea monocromática); o la duración del estímulo, por citar algunos. Sin embargo, existen numerosas variables que no quedan definidas, y cuya incidencia es posible ponderar si se controlan y varían de forma adecuada durante el proceso de toma de datos. Podemos citar, a modo de ejemplo la incidencia de la reflectancia de los paramentos, la distribución de luminancias en el campo visual periférico, el estado de adaptación o la edad del observador, etc.

5.2 Análisis documental de los fundamentos teóricos.

Como se ha indicado anteriormente, los datos utilizados para el desarrollo de la función de sensibilidad fueron obtenidos para un número limitado de observadores mediante las técnicas de identificación directa del brillo y fotometría de parpadeo. La retina es sensible a la densidad de flujo luminoso que llega a ella; y, como acabamos de indicar, la magnitud física que produce este flujo es la luminancia. En ambos métodos la sensibilidad espectral del ojo humano queda definida conforme a la equivalencia del efecto visual de percepción de brillo. Sin embargo, siendo la sensación de brillo un atributo de la percepción, no se corresponde exactamente con la luminancia, que es una magnitud física (CIE, 1995).

En el caso de la identificación directa de brillo, la superficie visualizada se divide en dos sectores contiguos que reciben radiaciones monocromáticas en longitudes de onda muy próximas. Mientras se modifica la radiancia de uno de los dos sectores, el observador debe valorar cuando se minimiza la diferencia de brillo entre ambos estímulos. La naturaleza de la fotometría de parpadeo es

⁵ En el caso de la lectura, la tipología de tarea, desde un punto de vista perceptivo, responde a la identificación de contornos de alto contraste, a diferencia de la empleada para la elaboración de la función de sensibilidad, que se centra en la variación mínima de brillo que el ojo humano tipo es capaz de detectar.

similar, si bien los estímulos se alternan en una posición fija del campo visual. Sin embargo, en los procesos visuales, para que el estímulo genere información útil, no basta con que las superficies observadas alcancen determinados niveles de luminancias, sino que deben establecerse relaciones de luminancia diferenciadas entre las distintas regiones del campo visual. Sobre esta base el sistema cognitivo ha desarrollado diferentes capacidades en las que interviene tanto aspectos perceptivos como cognitivos: sensibilidad al contraste de luminancias, sensibilidad al contraste cromático, identificación de texturas, representación mental de la forma y del espacio, etc.

Los dos métodos considerados por Gibson y Tyndall se limitan a analizar la equiparación de la sensación visual de brillos sin tomar en consideración estos conceptos; de forma que aspectos tales como la agudeza visual o la percepción de contornos no son tomados en cuenta por esta función de sensibilidad. El proceso seguido para la equiparación de brillo de dos sensaciones visuales de diferente cromaticidad está basado en el desvanecimiento del límite entre ambos que, en definitiva, es un proceso perceptivo que difiere de la identificación de contornos necesaria para realizar una tarea de lectura o escritura. Por otra parte, los estímulos que se utilizaron durante el proceso de toma de datos son monocromáticos, en tanto el estímulo que se produce en nuestro visual es consecuencia de un conjunto de radiaciones diferentes longitudes de onda mezcladas. Existen ciertas dudas en relación a las variaciones perceptivas que puede implicar la mezcla de radiaciones de diferentes longitudes de onda.

Para controlar la desviación de los resultados en el proceso de elaboración de la función de sensibilidad espectral, fue necesario definir profusamente las condiciones de observación bajo las que debía efectuarse la toma de datos. En este sentido, algunos de los estudios documentados por Gibson y Tyndall fueron descartados durante la última fase del proceso de

elaboración de la curva debido a la existencia de pequeñas diferencias metodológicas que implicaban una variación de los resultados obtenidos.

Como puede observarse en la tabla 19, la luminancia del campo observado es muy superior en la investigación de Gibson y Tyndall; siendo la única que adopta valores de campo visual claramente fotópicos. Algunos autores, sin embargo, consideran que la limitación de campo impuesta mediante el dispositivo de observación hace que, incluso en esta última toma de datos, la cantidad de luz que alcanza el plano de la retina corresponda a valores mesópicos (Viikari et al., 2005). Por este motivo, en 1983 se definió la iluminancia retinal, medida en trolands, que es proporcional al producto del área de la pupila (natural o artificial) y a la luminancia de la superficie observada (Trezona, 1983).

Tabla 19. Resumen de las condiciones en que se desarrollaron las diferentes tomas de datos consideradas por Gibson y Tyndall.

Estudio:	Método Empleado *	Luminancia del campo visual	Campo visual	Iluminancia retiniana**
Ives, H.E. (1912)	F.P.	7,96 cd/m ²	2°	95 Td
Nutting, P.G. (1914)	F.P.	9,39 cd/m ²	2°	163 Td
Crittenden&Richtmeyer (1917)	Publicación elaborada sobre datos de Ives			
Coblentz & Emerson (1917)	F.P.	1,33 cd/m ²	2°	7-22-7 Td
Hyde et al. (1918)	B.M.	0,8-3,98-2,39 cd/m ²	7°	6-29-7 Td
Ives, H.E. (1919)	-	-	-	
Patterson & Dudding (1920)	-	-	-	
So (1920)	-	-	1,5°	168 Td
Priest (1921)-	-	-	-	
Exner, W. (1921)	-	-	-	
Gibson & Tyndall (1923)	B.M.	42,5-170-34 cd/m ²	3°	11-43-9 Td
*F.P.: Flocker Photometry. B.M.: Brightness Matching				
** Datos de iluminancia retiniana obtenidos de Viikari et al (2005)				

Considerando que el diámetro pupilar experimenta una variación significativa en función de la edad (miosis senil), podemos aventurar que la validez de la función de sensibilidad está restringida a colectivos muy específicos y para estímulos muy concretos. Conforme a los valores calculados por Weale, el diámetro pupilar se reduce aproximadamente un 42% entre los 25 y los 65 años (Weale, 1992); y, dado que la superficie de la pupila es directamente proporcional al cuadrado del radio, la densidad de flujo luminoso en el plano de la retina debe reducirse en esta proporción. A modo ilustrativo, la figura 36 muestra la variación del diámetro pupilar en función de la edad propuesta por la IES para tres niveles de luminancia (IES, 2011). En la misma, se aprecia que se trata de un incremento sensiblemente progresivo que se mantiene a lo largo de las diferentes etapas. Este hecho contrasta con la recomendación del IES de mantener los mismos niveles de iluminación para todo el colectivo entre los 25 y los 65 años.

Figura 36. Diámetro de apertura pupilar en función de la edad y la luminancia de la superficie observada. (IES, 2011).

Como puede observarse en la pendiente de las rectas, la variación es más acusada para luminancias bajas, similares a las empleadas en las investigaciones recogidas por la tabla 19. A modo orientativo, el incremento es de -0,43 mm/década para niveles de luminancia de 10 cd/m², -0,31 mm/década para niveles de luminancia de 200 cd/m² y -0,13 mm/década para 4000 cd/m² (tabla 20). Considerando, como se ha indicado, que el área de la pupila es proporcional al cuadrado del radio, encontramos que la disminución de la densidad de flujo luminoso en el plano de la retina debida exclusivamente a este proceso resulta significativa.

Tabla 20. Superficie de la abertura pupilar en función de la edad del observador y la luminancia de la superficie observada. Calculada a partir de los datos del IES.

Superficie de la pupila (mm ²) en función de la edad y la luminancia (cd/m ²)									
Edad lum.	[0-10]	(10-20]	(20-30]	(30-40]	(40-50]	(50-60]	(60-70]	(70-80]	(80-90]
10 cd/m ²	51,53	46,20	41,17	36,42	31,97	27,81	23,93	20,35	17,06
200 cd/m ²	31,17	28,09	25,16	22,40	19,79	17,35	15,07	12,95	10,99
4000 cd/m ²	13,20	12,13	11,10	10,12	9,19	8,30	7,45	6,65	5,90

El problema de la iluminancia retinal no se restringe a la miosis senil, sino que se intensifica de forma significativa a consecuencia de una degeneración progresiva de los medios visuales que afecta a sus prestaciones. El cristalino, por ejemplo, va perdiendo transmitancia con la edad, por lo que se genera una nueva reducción de la cantidad de radiación que alcanza el plano de la retina (figura 37, tabla 21). La pérdida de transmitancia que se produce entre los 25 y los 65 años tiene un orden de magnitud del 27%; disminuyendo este coeficiente, de forma progresiva, de 0,75 a 0,55.

Tabla 21. Valores medios de transmitancia del cristalino en función de la edad (IES, 2011).

Coeficiente de transmisión del cristalino (valor medio) en función de la edad									
Edad Lumin.	[0-10]	(10-20]	(20-30]	(30-40]	(40-50]	(50-60]	(60-70]	(70-80]	(80-90]
Transmitancia	0,82	0,78	0,75	0,72	0,66	0,62	0,55	0,48	0,43

Figura 37. Evolución de la apertura pupilar y la transmitancia el cristalino en función de la edad. (IES, 2011).

En relación al resto de medios oculares (cornea, humor vítreo, humor acuoso y membranas intraoculares) no parece existir una variación significativa de su transmitancia en función de la edad. Combinando la disminución del diámetro pupilar y la transmitancia del cristalino es posible hacer una primera estimación de la variación del efecto visual en función de la edad asociada a un estímulo externo constante para luminancias de tarea específicas (Ecuación 7).

Ecuación 7. Incremento relativo de la densidad de flujo luminoso en la retina en función de la edad. (Referenciado al colectivo de 20 a 30 años).

$$\Delta e_r = \frac{p_c}{p_{[20-30]}} \cdot \frac{\tau_c}{\tau_{[20-30]}}$$

Donde:

- Δe_r es el incremento del nivel de iluminación en el plano de la retina
- p_c es el área de la apertura pupilar media del colectivo estudiado
- $p_{[20-30]}$ es el área de la apertura pupilar media del colectivo de referencia
- τ_c es la transmitancia media del cristalino del colectivo estudiado
- $\tau_{[20-30]}$ es la transmitancia media del cristalino del colectivo de referencia

Los datos reflejados en la tabla 22 muestran los coeficientes de variación de la densidad de flujo en el plano de la retina para cada colectivo de edad referenciado el estímulo del grupo poblacional de entre 20 y 30 años. Para el cálculo de estos valores se ha tomado en consideración el incremento del área pupilar y la variación de la transmitancia del cristalino:

Tabla 22. Coeficientes de variación del estímulo retinal referenciados a un observador de 25 años. (Calculados tomando como base los datos publicados por el IES).

Coeficientes de variación de la densidad de flujo luminoso en la retina (cd/m ²)									
Edad Lumin.	[0-10]	(10-20]	(20-30]	(30-40]	(40-50]	(50-60]	(60-70]	(70-80]	(80-90]
10 cd/m ²	1,37	1,17	1,00	0,85	0,68	0,56	0,43	0,32	0,24
200 cd/m ²	1,35	1,16	1,00	0,85	0,69	0,57	0,44	0,33	0,25
4000 cd/m ²	1,30	1,14	1,00	0,88	0,73	0,62	0,49	0,38	0,30

Tomando en consideración estos valores, cabe suponer que la sensibilidad a la luz de un observador de 45 años es, cuando menos, un 32% inferior a la de un observador de 25 años. Sin embargo, los datos recogidos por Gibson y Tyndall para observadores con estos perfiles no reflejan esta variación. Esta contradicción se debe a que la función de visibilidad relativa no caracteriza la forma en la que ven unos observadores frente a otros, sino que se construye para cada individuo de forma introspectiva (conforme a los usos de la Teoría Clásica de la percepción). Se trata, por tanto, de una función interna que refleja la proporción en que cada radiación estimula al propio observador en relación a la de referencia, pero sin cuantificar la magnitud de este estímulo en términos absolutos.

El sistema fotométrico se asienta, por tanto, sobre dos pilares que no permiten establecer la forma en que dos observadores de las mismas características están percibiendo los mismos estímulos externos: Por una parte, la intensidad luminosa, que es una magnitud externa e independiente del observador; y, por otra, una función de sensibilidad que no puede evaluar la capacidad de esa intensidad luminosa para generar sensación visual, y se limita a establecer la proporción relativa de esa sensación para diferentes longitudes de onda.

Asumiendo que el estímulo próximo es directamente proporcional a la luminancia de la superficie observada; y que esta, a su vez, lo es al nivel de iluminación⁶, es posible realizar una primera estimación de las condiciones que permiten equiparar los estímulos retinales de dos observadores de diferente edad. Parece oportuno recordar que es este último, el estímulo próximo o retinal,

⁶ Esta afirmación es válida sobre el supuesto de que la reflexión de la superficie de trabajo es de carácter lambertiano, tal y como recomiendan los diferentes organismos reconocidos en el ámbito de la iluminación.

el que nuestro sistema visual toma como base para desarrollar los procesos perceptivos. Si la cantidad de luz que alcanza a la retina de un observador de 45 años es un 32% inferior que para un observador de 25 años; podemos estimar que, para igualar los estímulos próximos de ambos, deberíamos aplicar el porcentaje inverso y elevar la luminancia del estímulo distante del observador de mayor edad en un 47%. Para conseguir este incremento, se debería elevar en esa misma proporción el nivel de iluminación.

Este número es, tan sólo, una primera aproximación a un problema que nos permiten vislumbrar ciertas indefiniciones de carácter complejo. Así, por ejemplo, los valores empleados aquí corresponden a la transmitancia global en el espectro visible. Sin embargo, dado que la transmitancia de los medios oculares no es homogénea, el recorrido que realiza la luz entre la córnea y la retina no es independiente de la longitud de onda. Es necesario, por tanto, realizar un análisis más profundo que, además de consideraciones de tipo cuantitativo, abarque otros aspectos cualitativos referentes a la distribución espectral de la fuente empleada. El análisis realizado se recoge en el capítulo 6.

Es necesario hacer constar, finalmente, que el deterioro experimentado por el sistema visual a lo largo de los años no se limita a la fase óptica del mismo, sino que también afecta a los subprocesos de tipo retiniano y cerebral. En lo referente a la retina, se tiene constancia de una disminución progresiva de la concentración de conos en la fovea (Yuodelis y Hendrickson, 1986). Asimismo, las células ganglionares se reducen hasta un 50% entre los 20 y los 70 años, y el número de axones de estas se reduce en un 25%. La pérdida de neuronas en el córtex, hasta un 50% entre los 20 y los 80 años, es también un proceso continuo (Guirao, A., 1998). Sin embargo, estos procesos resultan difíciles de estudiar, incluso en sus aspectos perceptivos, por medios óptico. Por este motivo, su estudio se ha acometido mediante la toma de datos descrita en el capítulo 7.

CAPÍTULO 6.

VALORACION DE LA INTERACCIÓN ENTRE LA RADIACIÓN Y LOS MEDIOS OCULARES

CAPÍTULO 6. VALORACIÓN DE LA INTERACCIÓN ENTRE LA RADIACIÓN Y LOS MEDIOS OCULARES.

Como se ha indicado en el capítulo anterior, el sistema visual humano es sensible a la densidad de flujo luminoso que alcanza plano de la retina. Consecuentemente, una valoración de la calidad de la imagen que se forma en la misma, y sobre la cual se estructuran los procesos visuales, permite comprender algunos aspectos de las variaciones que experimentan estos procesos al incrementarse la edad de los observadores. Además de los aspectos cuantitativos relacionados con la intensidad de la imagen formada, deben tomarse en consideración otros aspectos cualitativos de la misma. El deterioro progresivo que experimenta esta imagen retinal parece estar íntimamente relacionado con la eficiencia con que pueden desarrollarse estos procesos.

Existe cierto consenso en que, en gran medida, la intensidad de la imagen formada en la retina es proporcional a la densidad de flujo luminoso que incide en la misma. A su vez, esta magnitud depende de la cantidad de luz que, tras atravesar los diferentes medios oculares, alcanza el fondo del ojo. Consecuentemente, resulta posible valorar la incidencia de la edad en la fase

óptica de los procesos visuales si se determina la cantidad de luz que en alcanza el plano de la retina en cada uno de los colectivos analizados.

Para llevar a cabo esta valoración se ha procedido al análisis de los efectos visuales que generan cuatro fuentes luminosas de diferente calidad cromática desde dos perspectivas diferentes: En primer lugar, se ha obtenido su flujo luminoso partiendo de la distribución espectral; en segundo lugar, se ha calculado la cantidad de energía que, tras incidir en el ojo, atraviesa los medios oculares y alcanza el plano de la retina contribuyendo a la formación de la imagen sobre la misma. Este segundo cálculo se ha desarrollado, para cada uno de los colectivos de edad, empleando datos obtenidos de diversas fuentes:

- La distribución espectral de las fuentes luminosas corresponde a los manantiales utilizados en la toma de datos. Como se discutirá a continuación, la calidad cromática de estos manantiales responde a los estándares empleados en el ámbito administrativo.
- Los datos de transmitancia espectral en función de la edad, para el conjunto de los medios oculares, se han tomado de la publicación número 203 de la CIE referente a la caracterización del ojo humano (CIE, 2012).
- Los diámetros de la apertura pupilar en función de la edad y de la luminancia se corresponden con los adoptados por la IES, que fueron publicados en 2011 (Dilaura, 2011)
- Los porcentajes de transmitancia difusa de los diferentes medios oculares proceden de la edición 2001 del manual de iluminación del IES (IESNA 2001), y resultan congruentes con las determinaciones clásicas de estos valores ya citadas en el estado del arte (Boettner, E.A., Wolter, J.R., 1962; Said, F.S., Weale, R.A. 1959)

Si el observador fotométrico patrón, empleado en el primer análisis descrito, es representativo de los procesos visuales independientemente de la edad el observador; la magnitud del estímulo que genera la imagen retinal no debería presentar grandes variaciones al considerar cada colectivo por separado. Para contrastar esta relación, se ha procedido a calcular el incremento cuantitativo de la imagen formada en la retina de cada caso,

6.1 Caracterización de las fuentes luminosas consideradas

El cálculo se ha realizado tomando en consideración cuatro manantiales luminosos led LM516B plus, fabricados por Samsung, que difieren en su temperatura de color correlacionada y, consecuentemente en la distribución espectral y la calidad cromática de la luz emitida. Una de las fuentes empleada es cálida (3000k), dos neutras (4000 K y 5000 K); y la cuarta fría (6500 K). Todas ellas tienen un IRC superior a 80, y responden a las características exigidas por la norma UNE-EN-12464-2012 para el ámbito administrativo.

La distribución espectral de las fuentes facilitada por los fabricantes ha sido contrastada mediante un análisis espectrofotométrico realizado, en las instalaciones del Laboratorio de Alumbrado Público de México D.F., con un dispositivo LMT GO DS 2000 (Figura 38). Los resultados obtenidos en este análisis resultan congruentes con los datos procedentes de la documentación técnica. Se trata de cuatro fuentes basadas en una tecnología de led azul, cuya emisión máxima se ubica alrededor de los 450 nm. La luz emitida por el led se combina con la radiada por una mezcla de dos fósforos, YAG:Ce³⁺ y (Sr,Ca)AlSi₃:Eu²⁺, que generan su máxima emisión en torno a los 540 nm (verde) y 620 nm (rojo) de longitud de onda respectivamente. Como puede observarse en las gráficas de intensidad radiante relativa (figura 39) todas ellas

producen radiación en las mismas regiones del espectro, diferenciándose únicamente en la proporción de luz emitida en cada región.

Figura 38. Imagen obtenida en el análisis espectral de las fuentes empleadas.

Figura 39. Curvas de emisión relativa de las cuatro fuentes luminosas consideradas.

6.2. Determinación del flujo luminoso de las fuentes tipificadas

Dado que las cuatro fuentes difieren sensiblemente en la proporción de luz emitida en cada región del espectro, antes de compararlas se ha procedido a tipificar los datos. Para ello, se ha calculado la cantidad de flujo radiante necesaria en cada longitud de onda para obtener una emisión global de 1 watio en todos los casos (ecuación 8). En este cálculo se ha considerado el diagrama de emisión relativa de las fuentes facilitado por el fabricante que, como se ha indicado, ha sido contrastado por procedimientos fotométrico. Así pues, todos los cálculos realizados están referenciados a la energía radiante emitida por cuatro fuentes luminosas normalizadas con similar flujo radiante (1 watio), pero con diferente distribución espectral y temperatura de color. En la figura 40 puede apreciarse un extracto de la tabla de cálculo generada con los valores de emisión obtenidos para cada una de las cuatro fuentes en el extremo superior del espectro visible (longitudes de onda larga).

Ecuación 8. Ecuación empleada para la reducción a 1 W de flujo radiante teórico.

$$\phi_{e,\lambda} = \frac{\phi_{e,\lambda}(\%)}{\int_{380}^{780} \phi_{e,\lambda} d\lambda}$$

Donde:

$\phi_{e,\lambda}$ es el flujo radiante emitido en cada longitud de onda
(para una emisión global de 1 watio).

$\phi_{e,\lambda}(\%)$ es la intensidad radiante relativa
(expresada en función de la emisión global)

$\int_{380}^{780} \phi_{e,\lambda} d\lambda$ es el área bajo la curva de intensidad radiante relativa

	Lámpara Led TCC: 3.000 K (CRI > 80)	Lámpara led TCC: 4.000 K (CRI>80)	Lámpara led TCC: 5.000 K (CRI>80)	Lámpara led TCC: 6.500 K (CRI>80)
(λ) nm	Flujo radiante (1 W en total)	Flujo radiante (1 W en total)	Flujo radiante (1 W en total)	Flujo radiante (1 W en total)
(655-660]	0,0167	0,0150	0,0094	0,0086
(660-665]	0,0147	0,0132	0,0083	0,0075
(665-670]	0,0128	0,0118	0,0071	0,0066
(670-675]	0,0114	0,0103	0,0064	0,0057
(675-680]	0,0097	0,0092	0,0056	0,0049
(680-685]	0,0085	0,0079	0,0048	0,0044
(685-690]	0,0074	0,0069	0,0041	0,0038
(690-695]	0,0062	0,0060	0,0036	0,0032
(695-700]	0,0055	0,0051	0,0031	0,0028
(700-705]	0,0045	0,0044	0,0025	0,0024
(705-710]	0,0040	0,0038	0,0022	0,0021
(710-715]	0,0033	0,0033	0,0020	0,0019
(715-720]	0,0028	0,0028	0,0016	0,0016
(720-725]	0,0025	0,0023	0,0014	0,0013
(725-730]	0,0021	0,0020	0,0011	0,0011
(730-735]	0,0017	0,0017	0,0009	0,0009
(735-740]	0,0015	0,0015	0,0008	0,0008
(740-745]	0,0013	0,0012	0,0007	0,0006
(745-750]	0,0011	0,0010	0,0005	0,0005
(750-755]	0,0009	0,0009	0,0004	0,0004
(755-760]	0,0007	0,0007	0,0003	0,0003
(760-765]	0,0006	0,0006	0,0003	0,0002
(765-770]	0,0005	0,0005	0,0002	0,0002
(770-775]	0,0004	0,0004	0,0002	0,0002
(775-780]	0,0004	0,0003	0,0001	0,0002
	1	1	1	1

Figura 40. Ejemplo de los valores de emisión de las cuatro fuentes con 1 W de flujo radiante.

Conforme a la estructura de nuestro sistema fotométrico, a partir de estos datos es posible obtener el flujo luminoso que corresponde a cada una de estas lámparas. Para ello, sólo es necesario multiplicar cada uno de los valores parciales de flujo radiante por los correspondientes coeficientes de eficacia luminosa relativa (obtenido a partir de la función aprobada por la CIE); y ponderar el resultado mediante la aplicación del valor de emisión luminosa correspondiente a la radiación de máxima eficacia¹ (ecuación 9). La figura 41 muestra la estructura de la tabla generada para el cálculo.

Ecuación 9. Determinación del flujo luminoso emitido por las fuentes normalizadas.

$$\phi_v = 683 \int_{380}^{780} \phi_{e,\lambda} \cdot K(\lambda) d\lambda$$

Donde:

$\phi_{e,\lambda}$ es el flujo radiante emitido en cada longitud de onda
(para una emisión global de 1 watio).

ϕ_v es el flujo luminoso total emitido por la fuente luminosa

$K(\lambda)$ es la eficacia luminosa para cada longitud de onda.
(Expresada en lm/W)

¹ En la actualidad, para los procesos visuales fotópicos se toma como referencia la eficacia luminosa espectral de una radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} Hz (aproximadamente 555 nm); que tiene un valor exacto de 683 lm/W.

		Lámpara Led TCC: 3.000 K (CRI > 80)	Lámpara led TCC: 4.000 K (CRI>80)	Lámpara led TCC: 5.000 K (CRI>80)	Lámpara led TCC: 6.500 K (CRI>80)
(λ) nm	V(λ)	Flujo luminoso (lm)	Flujo luminoso (lm)	Flujo luminoso (lm)	Flujo luminoso (lm)
(655-660]	0,061000	0,6963	0,6238	0,3926	0,3604
(660-665]	0,061000	0,6140	0,5517	0,3466	0,3124
(665-670]	0,032000	0,2805	0,2589	0,1562	0,1441
(670-675]	0,032000	0,2498	0,2253	0,1393	0,1235
(675-680]	0,017000	0,1128	0,1065	0,0649	0,0574
(680-685]	0,017000	0,0986	0,0921	0,0557	0,0509
(685-690]	0,008210	0,0415	0,0388	0,0229	0,0213
(690-695]	0,008210	0,0349	0,0336	0,0200	0,0181
(695-700]	0,004102	0,0153	0,0144	0,0086	0,0078
(700-705]	0,004102	0,0125	0,0124	0,0071	0,0067
(705-710]	0,002091	0,0057	0,0054	0,0032	0,0030
(710-715]	0,002091	0,0047	0,0047	0,0029	0,0027
(715-720]	0,001047	0,0020	0,0020	0,0011	0,0012
(720-725]	0,001047	0,0018	0,0017	0,0010	0,0010
(725-730]	0,000520	0,0008	0,0007	0,0004	0,0004
(730-735]	0,000520	0,0006	0,0006	0,0003	0,0003
(735-740]	0,000249	0,0003	0,0002	0,0001	0,0001
(740-745]	0,002490	0,0023	0,0021	0,0011	0,0010
(745-750]	0,000120	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000
(750-755]	0,000120	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000
(755-760]	0,000060	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
(760-765]	0,000060	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
(765-770]	0,000030	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
(770-775]	0,000030	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
(775-780]	0,000015	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
		322,77	318,10	327,85	308,52

Figura 41. Ejemplo de valores de ponderación empleados para determinar el flujo luminoso emitido por las fuentes normalizadas

Los flujos luminosos calculados por este procedimiento son bastante similares para las cuatro fuentes; siendo algo inferior para la fuente de 6.500 K, tal vez, como consecuencia de la mayor proporción de flujo en las longitudes de onda cortas. El mayor flujo luminoso, 327,85 lm, corresponde a la fuente de emisión neutra; y el menor, 308,52 lm, a la fuente de emisión fría. La tabla 23 recoge el flujo luminoso calculados para cada una de las fuentes, así como sus características cromáticas y energéticas básicas y la variación tomando como referencia la correspondiente a 5000 k.

Tabla 23. Características básicas de las cuatro fuentes luminosas analizadas.

	TCC	IRC	Flujo radiante	Flujo luminoso ²	Variación del flujo luminoso emitido
Fuente luminosa 1	3000 K	> 80	1 W	322,77 lm	-1,55 %
Fuente luminosa 2	4000 K	> 80	1 W	318,10 lm	-2,97 %
Fuente luminosa 3	5000 K	> 80	1 W	327,85 lm	0%
Fuente luminosa 4	6500 K	> 80	1 W	308,52 lm	-5,9 %

Los valores así obtenidos representan la cantidad de luz emitida por cada una de las fuentes conforme a la función de eficacia luminosa³. Consecuentemente, deberían guardar una relación directa con los efectos visuales producidos por las mismas independientemente de la edad.

Para confirmar este punto, se ha procedido a realizar un análisis cuantitativo de la imagen retinal generada en los diferentes grupos poblacionales

² Resulta conveniente puntualizar que la relación entre flujo luminoso y potencia que se puede extraer de esta tabla no responde al concepto de eficacia luminosa de la fuente; habida cuenta de que la potencia referenciada es la potencia de emisión en el espectro visible, y no la potencia consumida por el dispositivo de emisión.

³ Valor, expresado en lúmenes/watio, que relaciona el flujo luminoso generado por una radiación y el correspondiente flujo radiante

al emplear cada una de las fuentes. Como se ha indicado, si el sistema fotométrico es capaz de modelizar la sensación de luz, en mayor o menor medida, para el conjunto de observadores, los resultados obtenidos por ambos caminos deberían ser independientes de la edad de los observadores. En el capítulo dedicado al análisis de los resultados se procede a contrastar las variaciones que se registran en el flujo luminoso al alterar la calidad cromática de la fuente; con los incrementos de intensidad que experimenta la imagen generada en la retina de los diferentes colectivos por cada una de las fuentes. El análisis desde esta segunda perspectiva se ha articulado en dos pasos; por una parte, calculando la proporción del estímulo (intensidad del mismo) y; por otra, atendiendo a sus aspectos cualitativos (nitidez y contraste).

6.3 Determinación de los efectos visuales de las fuentes

6.3.1 Aspectos cuantitativos

En una primera aproximación al problema, se pretende poner de relieve la congruencia que manifestada entre la función de sensibilidad espectral y la imagen retinal generada en un colectivo de observadores similar al estudiado por Gibson y Tyndall. Por ello, los datos de transmitancia empleados para este cálculo inicial corresponden al colectivo de entre 20 y 39 años; rango de edad al que pertenecen el 90% de los individuos descritos en la propuesta de función de visibilidad de 1923. Razonablemente, se entiende que debería existir un cierto paralelismo en los resultados obtenidos en ambos cálculos.

Los coeficientes de transmisión de los medios oculares para las diferentes longitudes de onda están extraídos de la CIE 203:2012, dedicada a la caracterización del ojo humano (CIE, 2012). Aplicando estos valores a los datos de emisión de las cuatro fuentes es posible determinar la cantidad de energía

que, tras incidir en la córnea, atraviesa la pupila y consigue alcanzar el plano de la retina en cada caso. En la figura 42 puede verse un esquema del ojo con indicación de los diferentes medios visuales que la luz ha de atravesar antes de alcanzar la fovea.

Figura 42. esquema simplificado del ojo humano. (Fuente: es.wikipedia.org/wiki/Ojo_humano)

El valor mínimo de intensidad de imagen retinal calculado por este procedimiento corresponde, al igual que al aplicar la función de sensibilidad, a la fuente luminosa fría; Si bien los porcentajes correspondientes a las temperaturas de color neutras presentan ciertas discrepancias con los obtenidos al calcular el flujo luminoso. Los incrementos obtenidos en este caso, referenciados al valor mínimo, están recogidos en la tabla 24, junto a los valores calculados por aplicación directa de la función de sensibilidad obtenidos anteriormente.

*Tabla 24. Incremento de flujo luminoso e imagen retinal (para jóvenes adultos) de las fuentes.
(referenciado a la fuente de menor flujo luminoso).*

	6500 K	5000 K	4000 K	3000 K
Incremento de la cantidad de luz emitida (Obtenida por aplicación de la función $V(\lambda)$)	0 %	5,9 %	3,11 %	4,62 %
Incremento de la imagen retinal generada (Obtenida por aplicación de la transmitancia espectral)	0 %	1,6 %	4,04 %	5,61 %

Las variaciones detectadas en esta primera aproximación son meramente informativas. Pero, resulta interesante constatar que, para observadores de la misma edad, la aplicación de ambos métodos de cálculo no conduce a diferencias significativas. Sin embargo, como veremos a continuación, el mismo procedimiento aplicado para diferentes grupos de edad implica la aparición de variaciones que, difícilmente pueden pasarse por alto. Por otra parte, en la formación de la imagen retinal intervienen otros muchos factores; y el concepto de sensibilidad espectral no se limita únicamente a valorar el efecto de los medios oculares en términos de transmitancia; sino que responde a procesos más complejos.

a. Variación del estímulo debida a la transmitancia espectral.

Dado que la estructura de los medios visuales, especialmente del cristalino, se altera con la edad; se ha procedido a repetir este procedimiento de cálculo aplicada a los diferentes colectivos. Al igual que en el caso anterior, se han tomado en consideración los datos de transmitancia de los medios visuales publicados por la CIE (CIE, 2012) para los diferentes colectivos. Estos datos aparecen resumidos de forma gráfica en la figura 43.

Figura 43. Transmitancia de los medios oculares en función de la edad. (CIE 203:2012).

Con los datos extraídos del documento de la CIE es posible calcular, en función de la edad y para cada una de las fuentes luminosas analizadas, el deterioro que experimenta la imagen retinal como consecuencia de la variación de la transmitancia espectral de los medios oculares en su conjunto. Los valores obtenidos mediante este cálculo se han reflejado de dos formas distintas: por una parte, para cada uno de los grupos de edad, referenciados a la fuente que experimenta que optimiza la en cada caso (tabla 25; gráfica 1); y, por otra, de forma global referenciando los valores a la imagen de mayor intensidad, es decir, la generada por la fuente cálida en la retina del colectivo entre 20 y 29 años (tabla 26; gráfica 2).

Como puede observarse, la pérdida de intensidad que se produce en la imagen retinal como consecuencia de la transmitancia de los medios oculares es menos intensa para las fuentes de luz cálida en todos los colectivos de edad. No obstante, esta variación resulta menos acusada en los colectivos de menor edad; siendo de tan sólo un 4 % para los observadores más jóvenes (entre 20 y

29 años) y alcanzando un valor del 13 % para el colectivo de mayor edad. Si tomamos en consideración las dos variables, edad y temperatura de color, la penalización llega a alcanzar valores del orden del 23 %. Es reseñable que, manteniendo una temperatura de color cálida, esta pérdida de intensidad se reduce de un 17% a un 12%.

Tabla 25. Pérdida de intensidad de la imagen retinal obtenida para cada grupo de edad por aplicación del correspondiente coeficiente de transmisión de los medios visuales.

	3000 K	4000 K	5000 K	6500 K
20-29	1	0,98	0,96	0,94
30-39	1	0,98	0,95	0,93
40-49	1	0,97	0,93	0,92
50-59	1	0,97	0,93	0,90
60-69	1	0,96	0,90	0,87

*Tabla 26. Pérdida de intensidad de la imagen retinal referenciada a la imagen de mayor intensidad en función de la edad y la temperatura de color de la fuente luminosa.
(calculada por aplicación de los coeficientes de transmisión para cada longitud de onda)*

	3000 K	4000 K	5000 K	6500 K
20-29	1	0,97	0,96	0,94
30-39	0,97	0,95	0,92	0,91
40-49	0,95	0,92	0,88	0,87
50-59	0,91	0,88	0,85	0,82
60-69	0,88	0,85	0,79	0,77

Gráfica 1. Pérdida de intensidad de la imagen retinal obtenida para cada grupo de edad por aplicación del correspondiente coeficiente de transmisión de los medios visuales.

Gráfica 2. Pérdida de intensidad de la imagen retinal referenciada a la imagen de mayor intensidad en función de la edad y la temperatura de color de la fuente luminosa. (calculada por aplicación de los coeficientes de transmisión para cada longitud de onda)

b. Variación del estímulo debido a la apertura pupilar.

Como se ha indicado anteriormente, el proceso de pérdida de intensidad de la imagen retinal no responde exclusivamente a la transmitancia de los medios oculares, sino que está condicionado por otros parámetros. Tal es el caso de la apertura pupilar que, como se indicó en el capítulo anterior, experimenta una modificación significativa en función de la edad. Este fenómeno implica una reducción de la cantidad de luz que alcanza el plano de la retina que es directamente proporcional al cuadrado del radio de apertura pupilar. Dado que este incremento es independiente de la longitud de onda, es posible obtener la intensidad de la imagen retinal para cada uno de los colectivos resultante ponderando los valores calculados en el apartado anterior mediante los correspondientes coeficientes de reducción del área pupilar.

Sin embargo, la variación del diámetro pupilar depende, en cierta medida, de la luminancia de la superficie observada, por lo que previamente ha sido necesario calcular el rango de luminancias en que se desarrollan las tareas habituales del ámbito administrativo. Para ello, se ha tomado en consideración una superficie de trabajo de color blanco con reflexión difusa y suponiendo una reflectancia, para el papel blanco de 0,6; siendo esta una hipótesis conservadora. Aplicando la fórmula tradicional, propuesta por la IES, para el cálculo de luminancias a partir de los niveles de iluminación (ecuación 10), se han obtenido las luminancias correspondientes a los niveles empleados en la toma de datos (tabla 27).

En base a estos valores, y asumiendo los diámetros de apertura pupilar publicados por la IES (DiLaura, 2011), se ha calculado el factor de reducción de las superficies pupilares para una luminancia intermedia (200 cd/m^2), que se corresponde con un nivel de iluminación de 1000 lx. Los resultados así obtenidos se han referenciado al grupo de menor edad para poder valorar un coeficiente

de reducción de la imagen retinal único (tabla 28; gráfica 3)⁴. Adicionalmente, se han valorado los coeficientes asociados a luminancias⁵ de 10 cd/m² y 4000 cd/m²; constatándose que el coeficiente de reducción, dependiente de la edad, se incrementa ligeramente para bajas luminancias.

Ecuación 10. Fórmula empleada para el cálculo de la luminancia observada.

$$L = \frac{E \cdot \varphi}{\pi} = \frac{150 \cdot 0,6}{\pi} = 28,65 \frac{cd}{m^2}$$

Donde:

L, es la luminancia en el plano de trabajo expresada en cd/m²

E, es el nivel de iluminación medio de la superficie expresado en luxes

φ, es el coeficiente de reflexión global de la superficie

⁴ Resulta evidente que al aumentar la luminancia de 20 cd/m² a 200 cd/m² se produce una disminución de la apertura pupilar en todos los casos. Este incremento no ha sido tomado en consideración por ser similar para todos los grupos. Los valores obtenidos para los cinco colectivos poblacionales son de 0,61; 0,62; 0,63; 0,62 y 0,62 respectivamente. Es decir, al variar los niveles de luminancia todos los colectivos experimentan una disminución de la superficie pupilar del 40%.

⁵ La luminancia de 10 cd/m² corresponde al límite inferior del rango de visión fotópica, en tanto la de 4000 cd/m², está relacionado con niveles de iluminación natural.

Tabla 27. Luminancias calculadas para los niveles de iluminación de la toma de datos

Nivel de iluminación	Luminancia
150 lx	28,65 cd/m ²
200 lx	38,20 cd/m ²
300 lx	57,30 cd/m ²
500 lx	95,49 cd/m ²
750 lx	143,24 cd/m ²
1000 lx	190,99 cd/m ²
1500 lx	286,48 cd/m ²
2000 lx	381,97 cd/m ²
3000 lx	572,96 cd/m ²

Tabla 28. Superficie pupilar en mm² (y factores de reducción de la superficie).

Edad/lum.	20-29		30-39		40-49		50-59		60-69	
10 cd/m ²	41,17	(1,00)	36,42	(0,88)	31,97	(0,78)	27,81	(0,68)	23,93	(0,58)
200 cd/m²	25,16	(1,00)	22,40	(0,89)	19,79	(0,79)	17,35	(0,71)	15,07	(0,60)
4000 cd/m ²	11,34	(1,0)	10,12	(0,89)	9,08	(0,80)	8,04	(0,71)	7,07	(0,62)

Como puede observarse, en este caso, la variación de la intensidad de la imagen retinal en función de la edad resulta todavía más acusada; llegando a alcanzar valores próximos al 30% para el colectivo de 50-59 años. Consecuentemente, considerando que la luminancia de una superficie difusora es directamente proporcional al nivel de iluminación; y que la cantidad de luz que entra en el ojo es directamente proporcional a la superficie de la pupila, podemos estimar que es necesario elevar los niveles de iluminación en porcentajes inversos a los aquí obtenidos con el objeto de equiparar la intensidad del

estímulo retinal en todos los colectivos. Dado que el razonamiento que se acaba de hacer es extensible a los coeficientes obtenidos para la transmitancia espectral, resulta razonable unificar ambos en un único coeficiente de aplicación directa. Los valores así calculados están recogidos, en función de la edad y la temperatura de color, en la tabla 29 y la gráfica 3.

*Tabla 29. Pérdida de intensidad de la imagen retinal referenciada a la imagen de mayor intensidad en función de la edad y la temperatura de color de la fuente luminosa.
(calculada para una luminancia de 200 cd/m² considerando transmitancias y superficie pupilar)*

	3000 K	4000 K	5000 K	6000 K
20-29	1	0,97	0,96	0,94
30-39	0,86	0,85	0,82	0,81
40-49	0,75	0,73	0,70	0,69
50-59	0,65	0,62	0,60	0,58
60-69	0,53	0,51	0,47	0,46

*Gráfica 3. Pérdida de intensidad de la imagen retinal referenciada a la imagen de mayor intensidad en función de la edad y la temperatura de color de la fuente luminosa.
(calculada por aplicación de los coeficientes de transmisión y la superficie pupilar)*

De lo expuesto hasta este punto se deduce que los niveles de iluminación que permiten equiparar la imagen retinal generada para cada colectivo se pueden calcular multiplicando el nivel de referencia por la inversa de los coeficientes anteriores. Los valores de ponderación (en tanto por uno) así obtenidos están recogidos en la tabla 30 y gráfica 4:

Tabla 30. Coeficientes que es necesario aplicar al nivel de iluminación y que permiten equiparar la imagen retinal generada en cada uno de los colectivos.

	3000 K	4000 K	5000 K	6000 K
20-29	1	1,03	1,04	1,06
30-39	1,16	1,17	1,21	1,23
40-49	1,33	1,37	1,43	1,45
50-59	1,54	1,61	1,67	1,72
60-69	1,89	1,96	2,13	2,17

Gráfica 4. Coeficientes que es necesario aplicar al nivel de iluminación y que permiten equiparar la imagen retinal generada en cada uno de los colectivos.

6.3.2 Aspectos cualitativos

a. Transmitancia global y difusa de los medios oculares

Los datos publicados por la IES y la CIE corresponden a las transmitancias globales. Sin embargo, estos coeficientes son de naturaleza compleja. Resulta, por tanto, conveniente realizar una reflexión adicional en relación a los factores de corrección propuestos. La transmitancia global puede desglosarse en dos componentes: una directa, de carácter direccional, y que aporta información en el plano de la retina; y una difusa, que no aporta información útil y que, además, contribuye a deteriorar la calidad de la imagen formada. Sin embargo, durante el proceso de búsqueda documental, no se han localizado bases de datos que describan de forma detallada la evolución que experimentan los medios oculares a este respecto.

En cualquier caso, parece oportuno desarrollar una valoración cualitativa de la forma en que esta descomposición podría afectar a los factores propuestos; determinando cuando menos, si tiende a disminuir la sensibilidad del sistema en unas longitudes de onda específica; y si la disminución esta acentúa o corrige las variaciones anteriormente descritas. Para ello se ha realizado un estudio de la evolución de este proceso tomando en consideración la información publicada por la IES (IES, 2001). Este estudio no está desarrollado conforme al orden en que los medios oculares son atravesados por la luz, sino atendiendo a la mayor o menor complejidad de los fenómenos que en los mismos se producen.

- De todos los medios oculares el que menos afecta a la calidad de la imagen retinal es el humor acuoso (figura 44), dado que se trata de un líquido de consistencia acuosa que se regenera constantemente y que presenta una elevada transmitancia a todas las longitudes de onda con efectos de dispersión prácticamente despreciables. Como

consecuencia de su constante regeneración no presenta alteraciones ópticas dependientes de la edad.

Figura 44. Transmitancia del humor acuoso en función de la longitud de onda (IES, 2001).

- El humor vítreo es una sustancia gelatinosa algo menos cristalina. Conforme a los datos facilitados por la IES, la transmitancia es bastante elevada para todas las longitudes de onda del espectro visible (figura 45). Sin embargo, presenta una componente difusa de aproximadamente el 20% homogénea para todas las longitudes de onda.

A partir de los valores publicados por la IES, puede constatar que el porcentaje de transmitancia difusa presenta una ligera dependencia de la longitud de onda (tablas 31 y 32). La introducción de este fenómeno podría conllevar una modificación los factores de corrección propuestos. Sin embargo, en ausencia series de datos completas, nos limitaremos a tratar este proceso desde una perspectiva meramente cualitativa. La mayor pérdida de transmitancia

directa corresponde a las longitudes de onda corta, e implica una penalización algo superior en el caso de las fuentes de temperatura de color fría.

Figura 45. Transmitancia global y difusa (línea punteada) del humor vítreo en función de la longitud de onda (IES, 2001).

- La córnea tiene un mayor impacto en estos procesos, siendo responsable de un 25 % de la luz difusa que alcanza el plano de la retina (Vos, J.J., Bogaard, J., 1963). Conforme a los datos publicados por la IES (figura 46) la dispersión es superior para las longitudes de onda corta, por lo que, consecuentemente, la imagen retinal sufre una mayor pérdida de calidad al utilizar fuentes de luz fría. Las dos líneas de puntos representan la proporción de radiación directa para el colectivo de 20-29 años (línea superior) y el colectivo de 60-69 años (línea inferior). Como puede observarse, existe una mayor penalización para los colectivos de mayor edad y para las fuentes luminosas con mayor proporción de radiación en longitudes de onda corta (tablas 31 y 32).

Figura 46. Transmitancia global y difusa (línea de puntos) de la córnea en función de la longitud de onda. La línea inferior está referida al colectivo de mayor edad (IES, 2001).

- El último elemento analizado es el cristalino, por ser el que presenta una mayor complejidad. Un porcentaje importante de la radiación difusa intraocular se genera en esta lente, en una cantidad creciente que depende de la evolución, muy variable, que experimenta su estructura interna con la edad. Consecuentemente, los datos aportados por la IES (figura 47) presentan diferentes valores: la línea punteada superior representa la porción de transmisión directa para colectivos de 20-29 años; en tanto la intermedia da el valor medio para colectivos de 60-69 años que no han desarrollado cataratas; finalmente, la línea inferior representa los valores medios para el colectivo que sufre esta patología (tablas 31 y 32).

Figura 47. Transmitancia global y difusa (línea de puntos) del cristalino. La línea intermedia está referida al colectivo de mayor edad (IES, 2001).

Tabla 31. Porcentaje de transmisión difusa frente a global para colectivos de 20-29 años.

	400	450	500	550	600	650	700	750
Córnea	36,9%	30,2%	28,6%	26,9%	22,8%	22,5%	21,4%	17,4%
Humor Vítreo	20,3%	20,1%	19,2%	18,8%	17,9%	17,1%	16,2%	16,1%
Cristalino	-	23%	17,8%	14,9%	12,3%	10,3%	7,8%	7,0%

Tabla 32. Porcentaje de transmisión difusa frente a global para colectivos de 50-59 años.

	400	450	500	550	600	650	700	750
Córnea	50,2%	47,1%	42,8%	39,8%	35,8%	34,7%	33,9%	31,0%
Humor Vítreo	20,3%	20,1%	19,2%	18,8%	17,9%	17,1%	16,2%	16,1%
Cristalino	-	83,0%	60,2%	28,8%	15,2%	10,0%	7,8%	7,0%

Estos valores indican que el deterioro experimentado por el sistema visual es incluso más acusado que el que se ha considerado para el cálculo de los factores de corrección. Sin embargo, debido a la carencia de datos intermedios, no es posible determinar en qué proporción afecta a cada uno de los colectivos.

A título orientativo, se ha realizado una valoración con los valores disponibles para los colectivos de 20-29 años y 50-59 años. Para ello, se ha verificado previamente la congruencia entre los datos publicados por la IES (IESNA, 2000) y los procedentes de la CIE 203:2012. Así, por ejemplo, para el colectivo de menor edad y para una longitud de onda de 450 nm, la IES propone unos valores de transmitancia de 0,92 para el humor acuoso; 0,85 para la córnea; 0,93 para el cristalino y 0,93 para el humor vítreo. El producto de estos coeficientes (0,68) coincide sensiblemente con lo establecido por la CIE para el grupo de observadores de 20 a 29 años en la misma longitud de onda (0,64).

Sobre esta base se ha calculado la relación que se establece entre la transmitancia directa y la transmitancia difusa, para cada longitud de onda considerando los valores parciales de transmitancia que corresponden a cada uno de los medios. Los coeficientes así obtenidos permiten calcular la fracción de la radiación de cada longitud de onda que, aun atravesando los medios oculares, no aporta información útil a la imagen retinal. De la misma forma, los coeficientes complementarios a la unidad permiten calcular la fracción del flujo que se transmite de forma direccional y que, por tanto, aporta información efectiva en el plano de la retina (tabla 33). Dado que este fenómeno se produce, en mayor o menor medida, en todos los colectivos, resulta más interesante analizar su incremento con la edad, que los valores específicos de cada uno de los colectivos (tabla 34).

Los incrementos calculados ponen de manifiesto una fuerte dependencia de la longitud de onda, apreciándose una importante reducción para las longitudes de onda cortas.

Tabla 33. Coeficientes para el cálculo de la fracción de transmisión directa.

	400	450	500	550	600	650	700	750
20-29 años	0,68	0,72	0,75	0,78	0,81	0,83	0,84	0,84
50-59 años	-	0,49	0,55	0,64	0,72	0,78	0,82	0,83

Tabla 34. Factor de corrección de la intensidad de imagen retinal entre los (20-29) años y los (50-59) años como consecuencia del incremento de la transmitancia difusa.

400	450	500	550	600	650	700	750
-	0,68	0,73	0,82	0,89	0,94	0,97	0,99

b. Incremento de la borrosidad y reducción del contraste

Los efectos de la radiación difusa de los medios oculares no se limitan a una pérdida de intensidad de la imagen retinal; sino que, además, suponen la formación de un velo luminoso sobre la misma que incrementa su borrosidad y disminuye su contraste.

Este fenómeno afecta a la calidad de la imagen retiniana, pero no en la magnitud sugerida por los coeficientes calculados. Resulta viable estimar la magnitud del velo superpuesto a la imagen retinal tomando en consideración la distribución de las dos componentes de la radiación que alcanza la retina. La luz transmitida de forma directa se proyecta en una región definida del globo ocular que tiene su centro en la fovea (alineada con el eje óptico); en tanto la luz

dispersada en el interior se distribuye por toda la superficie del globo ocular. Si consideramos un radio medio de 1,15 cm para el ojo humano, obtenemos una superficie de distribución de esta luz dispersa de 16,6 cm² que, en tanto el área de proyección del campo visual central varía, en función de la apertura pupilar entre menos de 1 cm² y algo más de 4 cm². Así pues, en el caso más desfavorable; considerando una fuente de emisión fría y los porcentajes de transmisión directa indicados en la tabla 33, este velo superpuesto puede suponer una densidad de flujo del orden del 7% de la directa, en el caso del colectivo de menor edad, elevándose al 14% en el caso del colectivo de 50-59 años.

Al efecto comentado hay que añadir las consecuencias de otro fenómeno de segundo orden. La producción de luz por fluorescencia que se genera en los agregados proteicos del cristalino, así como al efecto producido en la misma línea por las sustancias fotoluminiscentes del epitelio pigmentado de la retina. Conforme a la literatura existente (Boynton, R.M., Clark, F.J.J., 1964; Zuclich, J.A. et al., 1992) se sabe que las longitudes de onda de excitación para ambas sustancias abarcan desde los 360 nm hasta los 430 nm. Al desplazarse hacia longitudes de onda mayores dentro de esta banda, la cantidad de energía emitida disminuye; pero, como contrapartida también se desplaza a longitudes de onda mayores. De esta forma, la luminosidad generada en las dos situaciones extremas permanece constante por presentar el ojo una mayor sensibilidad a las longitudes de onda medias. Tampoco en este caso disponemos de datos específicos para los grupos poblacionales intermedios; si bien, algunos estudios valoran la luminiscencia superpuesta a la imagen en un 1% para la población de menor edad y un 2% para las personas mayores de 65 años (Boyce, P.R., 2014).

Por tanto, la imagen puede verse alterada como consecuencia de la dispersión de parte de la luz en los medios oculares (más intensamente en el cristalino); así como por la luz generada dentro del ojo como consecuencia de

fenómenos luminiscentes asociados a algunas estructuras internas. El resultado es la aparición de un velo homogéneo superpuesto a la imagen visual generada. Como consecuencia, se altera el contraste y la nitidez de esta, pudiendo afectar al correcto desarrollo de la función visual. Dada la escasez de información sobre la evolución de estos procesos en función de la edad resulta complejo cuantificarlos. Sin embargo, atendiendo a los datos conocidos parece evidente que se trata de un proceso que se intensifica con la edad, especialmente si se trabaja con emisión en longitudes de onda cortas.

Considerando, que la radiación difusa procedente de ambos fenómenos se encuentre, en su conjunto, en un orden de magnitud del 8%-15% de la densidad de flujo recibida en la retina de forma directa, es posible valorar de qué manera afecta a la calidad de la imagen conforme a la definición de contraste (ecuación 11). Así, tomando como referencia para una tarea de lectura una reflectancia del papel de 0,7 y de la letra de 0,1; y considerando que la superficie de lectura es lambertiana, el contraste medido en la superficie adopta un valor de:

Ecuación 11. Determinación del contraste para la tarea de lectura sobre papel blanco.

$$C = \frac{L_f - L_d}{L_f} = \frac{\rho_f - \rho_d}{\rho_f} = \frac{0,7 - 0,1}{0,7} = 0,86$$

Donde:

C, es el contraste.

L_f, y L_d, son la luminancia de fondo y de detalle expresadas en cd/m²

ρ_f y ρ_d, Son la reflectancia de fondo y de detalle respectivamente

Pero, si consideramos la aportación de un velo luminoso homogéneo, los valores incrementados no estarán condicionados únicamente por las reflectancias de la superficie exterior y, consecuentemente, la relación de contraste disminuirá en relación inversa a la magnitud del velo generado (ecuación 12).

Ecuación 12. Determinación del contraste reducido por efecto del velo luminoso.

$$C_r = \frac{(\rho_f + 0,1) - (\rho_d + 0,1)}{\rho_f + 0,1} =$$
$$= \frac{(0,7 + 0,1) - (0,1 + 0,1)}{0,7 + 0,1} = 0,75$$

Donde:

C_r , es el *contraste reducido*

ρ_f y ρ_d , Son la *reflectancia de fondo y de detalle respectivamente*

CAPÍTULO 7.

TOMA DE DATOS. DESARROLLO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

CAPÍTULO 7. TOMA DE DATOS. DESARROLLO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Para corroborar la consistencia de los valores propuestos en el capítulo anterior, se ha procedido a realizar una toma de datos conforme a los parámetros establecidos en la metodología. Cabe incidir una vez más en que el objetivo de esta toma de datos no es determinar la capacidad cognitiva de los diferentes colectivos; sino que únicamente se pretende valorar los niveles de iluminación y la calidad de luz que optimizan, en cada caso, los procesos perceptivos relacionados con las tareas características del uso oficina.

Para ello se ha empleado la prueba estandarizada Toulouse Pieron (Toulouse, P; Pieron, H. 2013). Se trata de una tarea que requiere gran concentración y cuyo objetivo consiste en medir las aptitudes perceptivas y atencionales. El observador evaluado debe revisar, durante 10 minutos, una matriz de 1600 elementos gráficos identificando aquellos que son idénticos a los indicados en la cabecera del documento (en total un 25 % de los estímulos).

Sobre esta base, es posible evaluar la capacidad para concentrarse en la tarea, junto a la rapidez perceptiva y la atención sostenida. La principal puntuación del test es el IGAP (Índice Global de Atención y Percepción) que relaciona el número total de aciertos (A) con el total de errores (E) y de omisiones (ecuación 13). La figura 48 recoge el baremo general tipificado del test Toulouse Pieron (para adultos). La variable analizada en esta investigación no ha sido propiamente “el índice global de atención y percepción” tipificado por el test, sino la variación que el citado índice experimenta, para cada uno de los colectivos, al alterar las condiciones en que se lleva a cabo la prueba.

Ecuación 13. Ecuación para el cálculo del Índice global de atención y percepción.

$$\text{IGAP} = A - (E + O)$$

Donde:

A, es el número total de aciertos contabilizado.

E, es el número total de errores contabilizado

O, es el número de omisiones contabilizado

Percentiles	Puntuación directa (PD)	Eneatipos
Pc	IGAP	En
99	365 - 400	9
98	342 - 364	9
97	328 - 341	9
96	316 - 327	8
95	288 - 315	8
90	270 - 287	8
85	255 - 269	7
80	246 - 254	7
75	236 - 245	6
70	229 - 235	6
65	220 - 228	6
60	213 - 219	5
55	205 - 212	5
50	198 - 204	5
45	190 - 197	5
40	182 - 189	4
35	174 - 181	4
30	164 - 173	4
25	154 - 163	4
20	142 - 153	3
15	126 - 141	3
10	101 - 125	2
5	93 - 100	2
4	82 - 92	1
3	69 - 81	1
2	49 - 68	1
1	(-400) - 48	1
n	9.895	n
Media	204,56	Media
Dt	65,51	Dt

Figura 48. Baremo general de adultos del Test Toulouse Pieron

7.1 Desarrollo de la toma de datos

Cada uno de los 68 observadores ha realizado un total de 50 test Toulouse Pieron distribuidos en 9 sesiones de aproximadamente 1 hora y media de duración. Adicionalmente, 20 observadores han realizado una prueba breve diseñada para corroborar que los resultados obtenidos en el test son válidos para tareas de lectura y escritura con menores requerimientos de concentración. La

distribución de tiempos de cada una de las sesiones, con especificación de las tareas desarrolladas en cada caso, está recogida en la tabla 35.

Tabla 35. Distribución de tiempos de las diferentes sesiones de trabajo.

	Sesiones TP 1, 2, 3, 4	Sesiones TP 5, 6, 7, 8 y 9	Sesión Lectura escritura
Periodo de adaptación	15 minutos	15 minutos	15 minutos
Test TP 500 lx-4000 K	10 minutos	10 minutos	
Descanso	3 minutos	3 minutos	
Test Toulouse-Pieron 1	10 minutos	10 minutos	
Descanso	3 minutos	3 minutos	
Test Toulouse-Pieron 2	10 minutos	10 minutos	
Descanso	3 minutos	3 minutos	
Test Toulouse-Pieron 3	10 minutos	10 minutos	
Descanso	3 minutos	3 minutos	
Test Toulouse-Pieron 4	10 minutos	10 minutos	
Descanso	3 minutos		
Test Toulouse-Pieron 5	10 minutos		
Prueba lectura-escritura			5 minutos
Descanso			3 minutos
Prueba lectura-escritura			5 minutos
Descanso			3 minutos
Prueba lectura-escritura			5 minutos
Descanso			3 minutos
Prueba lectura-escritura			5 minutos
			3 minutos
			5 minutos
DURACIÓN TOTAL	1 h y 30 min	1 h y 17 min	53 min

Con antelación al inicio de la toma de datos se ha procedido a informar a los participantes del objeto del estudio y de la relevancia científica de la investigación. Asimismo, se les ha facilitado una carta de consentimiento informado donde se recogen diferentes aspectos relativos a la propia investigación y al tratamiento de los datos recabados. Finalmente, se ha

verificado que los participantes no presentan problemas de agudeza visual utilizando para ello el test de anillos de Landolt.

Al inicio de cada sesión, y antes de comenzar a resolver los test, se han dedicado 15 minutos a explicar a los participantes algunos conceptos relacionados con la investigación. El objetivo real de este intervalo está relacionado con el proceso de adaptación necesario para optimizar las condiciones visuales en que se lleva a cabo la resolución de los test, habida cuenta de que no se tiene control sobre las circunstancias visuales en que cada observador accede al espacio de trabajo al inicio de cada sesión. Durante esta fase se han controlado las condiciones de luminancia, manteniéndola en niveles inferiores a los empleados durante la realización del primer test. Dado que todas las pruebas se desarrollan con valores de luminancia fotópicos; este intervalo de tiempo es suficiente para asegurar que los participantes se encuentran adaptados a los niveles en que se lleva a cabo la toma de datos.

Durante el periodo de adaptación de la primera sesión se han recogido las cartas de consentimiento informado, se han dado instrucciones sobre el desarrollo de la prueba y se ha permitido trabajar con el test a los participantes para que se familiaricen con el mismo¹. Una vez adaptados los observadores a las condiciones de luminancia de trabajo, han pasado a ocupar los puestos en los que se encuentra preparado el primer test. El papel empleado para la impresión del test tiene una reflectancia, difusa, de aproximadamente el 70%. En la cara anterior aparecen las figuras de referencia, la matriz de símbolos a reconocer y las casillas para proceder al cálculo del IGAP (figura 49); en tanto

¹ En la primera fase de la investigación fue valorada la posibilidad de emplear diversas pruebas. Durante este periodo se detectó que la mayor parte de los observadores obtenían unos resultados sensiblemente inferiores en el primer test, en tanto en los sucesivos el rendimiento se mantenía constante.

en la parte posterior, se encuentra espacio para rellenar los datos personales y la matriz de respuestas que permite realizar la corrección al trasluz.

Errores = Total de Respuestas - Aciertos

Aciertos = Posibilidades - Omisiones

Posibilidades de acierto de toda la prueba

Respuestas	Omisiones				
R <input style="width: 40px;" type="text"/>	O <input style="width: 40px;" type="text"/>	P <input style="width: 40px;" type="text"/>	A = P - O <input style="width: 40px;" type="text"/>	E = R - A <input style="width: 40px;" type="text"/>	
$IGAP = A - (E + O)$ <input style="width: 40px;" type="text"/>			$ICI = \frac{A - E}{R} \times 100$ <input style="width: 40px;" type="text"/>		

Figura 49. Datos de corrección empleados en la valoración de la prueba.

Con antelación al inicio de la prueba los test están ocultos bajo una hoja que se retira a la puesta en marcha del cronómetro. Las condiciones iniciales (500 lx y 4000 K) se repiten en todas las sesiones con idea de poder detectar posibles variaciones en la atención de cada observador debidas a factores externos a la prueba (cansancio, estado de salud, ...). El test Toulouse Pieron se resuelve de forma ordenada, de izquierda a derecha y desde la parte superior hacia abajo. Tras transcurrir el primer minuto y los sucesivos, el responsable de la prueba indica el tiempo y los participantes deben marcar la posición alcanzada hasta ese momento.

Finalizado cada test, los participantes pasan a la sala de descanso mientras se ajustan los niveles de los puestos de trabajo para la siguiente prueba. Esta operación permite que el punto focal de los observadores se sitúe, durante el periodo de descanso, a una distancia superior a 1 m, relajando de esta forma el cristalino y evitando un posible cansancio ocular debido a la tensión constante de los músculos ciliares.

7.2 Estructura de la toma de datos.

La toma de datos se ha desarrollado en 9 niveles de iluminación, entre 150 y 3000 luxes, cuyos valores concretos están basados en las etapas recomendadas por la norma EN-12665:2018². Estos niveles se han combinado con 4 temperaturas de color, dando lugar a 36 escenarios posibles (tabla 36). Como se indicó en la descripción metodológica los observadores se han distribuido en dos secciones, cada una de las cuales ha realizado los test en 20 combinaciones diferentes. El nivel normativo (500 lx) se ha empleado como nivel de referencia y, consecuentemente, todos los grupos han realizado test con ese nivel de iluminación.

Tabla 36. Valores de las condiciones experimentales empleadas en cada sección.

E (lx) TCC (K)	150	200	300	500	750	1000	1500	2000	3000
3000 K	Secc. 1	Secc. 2	Secc. 1	S. 1-2	Secc. 2	Secc. 1	Secc. 2	Secc. 1	Secc. 2
4000 K	Secc. 1	Secc. 2	Secc. 1	REF.	Secc. 2	Secc. 1	Secc. 2	Secc. 1	Secc. 2
5000 K	Secc. 1	Secc. 2	Secc. 1	S. 1-2	Secc. 2	Secc. 1	Secc. 2	Secc. 1	Secc. 2
6500 K	Secc. 1	Secc. 2	Secc. 1	S. 1-2	Secc. 2	Secc. 1	Secc. 2	Secc. 1	Secc. 2

La estructura de las 9 sesiones está recogida en la tabla 37 para los grupos de la sección 1 y en la tabla 38 los grupos de la sección 2. Esta división en sesiones “cortas” tiene como objetivo evitar problemas derivados de la fatiga acumulada y la monotonía. Por el mismo motivo, parte de las sesiones se han desarrollado con niveles de iluminación crecientes y otra parte con niveles de

² La actual norma de referencia en España es la norma UNE-EN-12665:2012; sin embargo, la actualización de la norma europea en 2018 (EN-12665:2018) implica su modificación inmediata. Por este motivo, se ha empleado para la cita el documento europeo.

iluminación decrecientes. En las cuatro primeras sesiones (Serie 1) se han realizado cinco test manteniendo la fija la temperatura de color y modificando los niveles de iluminación; en tanto en cinco las restantes, se han modificado las temperaturas de color manteniendo fijos los niveles de iluminación. Con el objetivo de detectar alteraciones puntuales en la capacidad perceptiva de cada individuo, se ha realizado un test de referencia bajo las mismas condiciones de nivel de iluminación (500 lx) y temperatura de color (4000K) al inicio de cada sesión.

Tabla 37. Distribución de sesiones para los grupos de la sección 1.

E (lx) TCC (K)	150	300	500	1000	2000		
3000 K	Tipo 1	Tipo 1	Tipo 1	Tipo 1	Tipo 1	Sesión 2	Serie 1
4000 K	Tipo 1	Tipo 1	Normativa	Tipo 1	Tipo 1	Sesión 1	
5000 K	Tipo 1	Tipo 1	Tipo 1	Tipo 1	Tipo 1	Sesión 3	
6500 K	Tipo 1	Tipo 1	Tipo 1	Tipo 1	Tipo 1	Sesión 4	
	Sesión 5	Sesión 6	Sesión 7	Sesión 8	Sesión 9		
	Serie 2						

Tabla 38. Distribución de sesiones para los grupos de la sección 2.

E (lx) TCC (K)	200	500	750	1500	3000		
3000 K	Tipo 2	Tipo 2	Tipo 2	Tipo 2	Tipo 2	Sesión 4	Serie 1
4000 K	Tipo 2	Tipo 2	Normativa	Tipo 2	Tipo 2	Sesión 1	
5000 K	Tipo 2	Tipo 2	Tipo 2	Tipo 2	Tipo 2	Sesión 2	
6500 K	Tipo 2	Tipo 2	Tipo 2	Tipo 2	Tipo 2	Sesión 3	
	Sesión 9	Sesión 8	Sesión 7	Sesión 6	Sesión 5		
	Serie 2

7.3 Análisis de los datos obtenidos.

El tratamiento de los datos obtenidos en la serie 1 y la serie 2 difiere sensiblemente como consecuencia de la naturaleza de los mismos. No se debe perder de vista que, en tanto el nivel de iluminación es una variable de carácter cuantitativo; la temperatura de color correlacionada es una variable cualitativa, independientemente de tener denominación numérica. La prueba de lectoescritura definida en el capítulo metodológico, menos exigentes en términos atencionales, se ha empleado únicamente para verificar los valores obtenidos en los test estandarizados para tareas características de oficina.

7.3.1 Datos de la serie 1. Variación del nivel de iluminación

Como se ha indicado, cada una de las cuatro sesiones de esta serie se ha desarrollado modificando los niveles de iluminación para una temperatura de color correlacionada específica. Se ha tomado como valor de referencia el correspondiente al nivel de iluminación de 500 lx, por ser este el establecido en las diferentes normativas para las tareas de oficina; y asignando el valor unitario al IGAP correspondiente a este nivel se ha determinado el incremento experimentado por el índice en las diferentes condiciones de trabajo. Consecuentemente, es posible analizar los incrementos que experimenta el IGAP en función de la iluminancia para cada uno de los colectivos de edad.

Tras finalizar la toma de datos, se ha verificado que la varianza obtenida en cada caso no excede de los valores empleados en la determinación del tamaño de la muestra, descrita en el capítulo dedicado a metodología. Asimismo, con los datos de varianza actualizados se ha procedido a recalcular el error para cada colectivo, obteniéndose los valores máximos para las series correspondientes a los observadores de mayor edad, pero siempre por debajo del valor (4%) empleado al determinar la dimensión de la muestra (ecuación 14).

Ecuación 14, Ecuación empleada para la determinación del error de cada serie.

$$\varepsilon_0 = \sqrt{\frac{S^2}{n} - \frac{S^2}{N}}$$

Donde:

ε_0 es el error obtenido para cada serie de datos

n es el tamaño de la muestra de cada colectivo

N es la población total de cada uno de los colectivos

S^2 es la varianza calculada mediante el programa Excel 365

Finalmente, se ha calculado el coeficiente de correlación de Pearson para cada una de las series en su conjunto y para los intervalos de máxima pendiente dentro de cada una. Los resultados estadísticos obtenidos están recogidos en las páginas siguientes (tablas 39, 40, 41, 42 y 43; gráficas 5, 6, 7, 8 y 9).

a. Resultados obtenidos para el colectivo de 20 a 29 años.

Los coeficientes de Pearson calculados para el colectivo de menor edad indican correlación lineal positiva entre los niveles de iluminación y la eficiencia perceptiva. Correlación que se intensifica ligeramente en la región central de la gráfica (entre 150 y 500 luxes), excepto para la serie desarrollada con temperatura de color fría. Las variaciones obtenidas en el índice de atención y percepción resultan poco significativas, disminuyendo entre un 3% y un 5% para el menor nivel de iluminación empleado; y aumentando de 3% a un 6% para el mayor nivel de iluminación. La escasa variación observada sugiere que, para este colectivo y desde un punto de vista perceptivo, podrían reducirse los niveles de iluminación actualmente recomendados; si bien, durante el desarrollo de las sesiones, los observadores han definido como “bajos” los niveles de iluminación

de 150 lx y 200 lx. En relación a las temperaturas de color correlacionadas, no se observa un patrón que permita valorar variaciones del proceso perceptivo al emplear un valor específico. Sin embargo, es necesario recordar que esta primera serie está diseñada para discriminar los niveles de iluminación y que, en cada una de las sesiones se ha trabajado con una calidad cromática específica.

Tabla 39. Parámetros estadísticos relativos al incremento experimentado por el IGAP al modificar los niveles de iluminación manteniendo fija la temperatura de color para el colectivo de entre 20 y 29 años de edad (referenciados al IGAP obtenido para 500 lx).

Valores estadísticos obtenidos para el colectivo 20-29 años en la serie 1 (TCC 3000 K)									
Iluminancia (lx)	150	200	300	500	750	1000	1500	2000	3000
Media	0,95	0,97	0,99	1,00	1,02	1,03	1,03	1,05	1,04
Varianza	0,00312	0,00017	0,00037	0,00000	0,00057	0,00023	0,00003	0,00017	0,00009
D. Típica	0,05586	0,01291	0,01924	0,00000	0,02380	0,01517	0,00500	0,01304	0,00957
Error (%)	1,86	0,43	0,64	0,00	0,79	0,50	0,17	0,43	0,32
Coeficiente de correlación global				0,6641	C. de correlación ₍₁₅₀₋₅₀₀₎				0,7359
Valores estadísticos obtenidos para el colectivo 20-29 años en la serie 1 (TCC 4000 K)									
Iluminancia (lx)	150	200	300	500	750	1000	1500	2000	3000
Media	0,97	0,96	0,98	1,00	1,00	1,03	1,04	1,03	1,03
Varianza	0,00027	0,00390	0,00007	0,00000	0,00047	0,00023	0,00009	0,00103	0,00003
D. Típica	0,01643	0,06245	0,00837	0,00000	0,02160	0,01517	0,00957	0,03202	0,00500
Error (%)	0,55	2,08	0,28	0,00	0,72	0,50	0,32	1,07	0,17
Coeficiente de correlación global				0,6541	C. de correlación ₍₁₅₀₋₅₀₀₎				0,7459
Valores estadísticos obtenidos para el colectivo 20-29 años en la serie 1 (TCC 5000 K)									
Iluminancia (lx)	150	200	300	500	750	1000	1500	2000	3000
Media	0,97	0,96	0,98	1,00	1,00	1,03	1,04	1,03	1,03
Varianza	0,00027	0,00390	0,00007	0,00000	0,00047	0,00023	0,00009	0,00103	0,00003
D. Típica	0,01643	0,06245	0,00837	0,00000	0,02160	0,01517	0,00957	0,03202	0,00500
Error (%)	0,55	2,08	0,28	0,00	0,72	0,50	0,32	1,07	0,17
Coeficiente de correlación global				0,6345	C. de correlación ₍₁₅₀₋₅₀₀₎				0,7658
Valores estadísticos obtenidos para el colectivo 20-29 años en la serie 1 (TCC 6500 K)									
Iluminancia (lx)	150	200	300	500	750	1000	1500	2000	3000
Media	0,97	0,98	0,98	1,00	1,01	1,03	1,04	1,05	1,06
Varianza	0,00013	0,00069	0,00007	0,00000	0,00057	0,00017	0,00009	0,00003	0,00003
D. Típica	0,01140	0,02630	0,00837	0,00000	0,02380	0,01291	0,00957	0,00577	0,00577
Error (%)	0,38	0,88	0,28	0,00	0,79	0,43	0,32	0,19	0,19
Coeficiente de correlación global				0,6921	C. de correlación ₍₁₅₀₋₅₀₀₎				0,7610

Gráfica 5. Incrementos del Índice General de Atención y Percepción (eje vertical) para el colectivo de 20 a 29 años, obtenidos al variar el nivel de iluminación (eje horizontal, en lx) para las diferentes calidades de luz (TCC en K) empleadas en la toma de datos.

b. Resultados obtenidos para el colectivo de 30 a 39 años.

Los coeficientes de Pearson obtenidos para el total de observaciones de estas series resultan muy similares a los del colectivo más joven. Sin embargo, el estudio de la correlación por sectores permite detectar una mayor dependencia para el intervalo entre 200 y 750 luxes, coincidiendo con la región de mayor pendiente de la gráfica. La disminución del índice analizado es algo superior en este caso, alcanzando valores entre el 12% y el 18% para el nivel de iluminación de 150 lx; si bien la dispersión de los datos obtenidos es también superior.

En lo referente a la temperatura de color, no se aprecian grandes diferencias; pero las mayores pérdidas para bajos niveles de iluminación corresponden a las calidades cromáticas más frías; posiblemente como consecuencia de los procesos de deterioro del sistema visual dependientes de la longitud de onda descritos en el capítulo anterior, y de la mayor carga de radiación en longitudes de onda corta emitida por estas fuentes.

Como se ha indicado, la pendiente de la gráfica resulta sensiblemente superior entre 200 y 750 lx; lo que se traduce en incrementos de eficiencia perceptiva significativos, del orden del 5%, para cada salto cuantitativo. A partir de ese punto, los sucesivos incrementos de iluminancia no van asociados a un desarrollo más efectivo de los procesos analizados.

Tabla 40. *Parámetros estadísticos relativos al incremento experimentado por el IGAP al modificar los niveles de iluminación manteniendo fija la temperatura de color para el colectivo de entre 30 y 39 años de edad (referenciados al IGAP obtenido para 500 lx).*

Valores estadísticos obtenidos para el colectivo 30-39 años en la serie 1 (TCC 3000 K)									
Iluminancia (lx)	150	200	300	500	750	1000	1500	2000	3000
Media	0,88	0,92	0,98	1,00	1,05	1,06	1,05	1,06	1,07
Varianza	0,01108	0,00304	0,00017	0,00000	0,00027	0,00097	0,00075	0,00067	0,00022
D. Típica	0,10526	0,05514	0,01304	0,00000	0,01643	0,03114	0,02733	0,02588	0,01472
Error (%)	3,17	1,66	0,39	0,00	0,50	0,94	0,82	0,78	0,44
Coeficiente de correlación (global)				0,6373	Coeficiente de correlación (valor-valor)				0,8681
Valores estadísticos obtenidos para el colectivo 30-39 años en la serie 1 (TCC 4000 K)									
Iluminancia (lx)	150	200	300	500	750	1000	1500	2000	3000
Media	0,89	0,91	0,97	1,00	1,04	1,05	1,05	1,06	1,05
Varianza	0,00868	0,00518	0,00137	0,00000	0,00019	0,00040	0,00016	0,00032	0,00031
D. Típica	0,09317	0,07195	0,03701	0,00000	0,01366	0,02000	0,01265	0,01789	0,01751
Error (%)	2,81	2,17	1,12	0,00	0,41	0,60	0,38	0,54	0,53
Coeficiente de correlación (global)				0,6117	Coeficiente de correlación (300-1000)				0,8201
Valores estadísticos obtenidos para el colectivo 30-39 años en la serie 1 (TCC 5000 K)									
Iluminancia (lx)	150	200	300	500	750	1000	1500	2000	3000
Media	0,86	0,89	0,98	1,00	1,04	1,05	1,04	1,05	1,05
Varianza	0,00683	0,00356	0,00077	0,00000	0,00019	0,00040	0,00043	0,00137	0,00079
D. Típica	0,08264	0,05967	0,02775	0,00000	0,01366	0,02000	0,02066	0,03701	0,02805
Error (%)	2,49	1,80	0,84	0,00	0,41	0,60	0,62	1,12	0,85
Coeficiente de correlación (global)				0,6069	Coeficiente de correlación (300-1000)				0,8449
Valores estadísticos obtenidos para el colectivo 30-39 años en la serie 1 (TCC 6500 K)									
Iluminancia (lx)	150	200	300	500	750	1000	1500	2000	3000
Media	0,82	0,88	0,97	1,00	1,06	1,06	1,05	1,07	1,07
Varianza	0,00737	0,00267	0,00113	0,00000	0,00067	0,00080	0,00088	0,00127	0,00115
D. Típica	0,08585	0,05167	0,03362	0,00000	0,02582	0,02828	0,02966	0,03564	0,03391
Error (%)	2,59	1,56	1,01	0,00	0,78	0,85	0,89	1,07	1,02
Coeficiente de correlación (global)				0,6215	Coeficiente de correlación (300-1000)				0,8057

Gráfica 6. Incrementos del Índice General de Atención y Percepción (eje vertical) para el colectivo de 30 a 39 años, obtenidos al variar el nivel de iluminación (eje horizontal) para las diferentes calidades de luz empleadas en la toma de datos.

c. Resultados obtenidos para el colectivo de 40 a 49 años.

Como puede observarse en los diagramas desglosados de la gráfica 7, los valores obtenidos en este caso experimentan una mayor dispersión. La región de máxima pendiente, y que simultáneamente presenta un valor del coeficiente de correlación superior, corresponde al intervalo 200-750 lx; con la singularidad de que comienzan a apreciarse diferencias relacionadas con la calidad cromática de las fuentes.

En este sentido, cabe mencionar que los incrementos del IGAP observados al aumentar los niveles por encima de los 500 lx son algo menores en las curvas correspondientes a las fuentes de 5000 K y 6500 K. Por otra parte, la región de máxima pendiente se extiende en estos dos casos hasta el nivel de iluminación de 1000 lx. Asimismo, al bajar los niveles por debajo de los 500 lx, los incrementos son negativos y presentan órdenes de magnitud similares, si bien, también en esta región comienzan a aparecer ciertas diferencias asociadas a la temperatura de color; siendo experimentada la mayor disminución al emplear fuentes de luz frías.

Las curvas comienzan a adoptar una forma de “s”, similar a la de las curvas de contraste empleadas en fotografía. Esta estructura sugiere unos umbrales a partir de los cuales los procesos visuales no se desarrollan correctamente, que se corresponden con la región izquierda de la curva, de menor pendiente, y que en este colectivo concreto parece terminar en los 200 lx. En el lado opuesto de la curva encontramos otra región de baja pendiente que está asociada a un nivel de iluminación umbral, por encima del cual los incrementos no se asocian a una mayor eficiencia en el desarrollo de los procesos perceptivos. En el colectivo analizado, este valor varía dependiendo de la calidad cromática de la fuente empleada. La región de menor pendiente comienza en

750 lx para las fuentes de 3000 K y 4000 K; y en 1000 lx para la fuente neutra de 5000 K y la fría de 6500 K.

Tabla 41. Parámetros estadísticos relativos al incremento experimentado por el IGAP al modificar los niveles de iluminación manteniendo fija la temperatura de color para el colectivo de entre 40 y 49 años de edad (referenciados al IGAP obtenido para 500 lx).

Valores estadísticos obtenidos para el colectivo 40-49 años en la serie 1(TCC 3000 K)									
Iluminancia (lx)	150	200	300	500	750	1000	1500	2000	3000
Media	0,81	0,84	0,91	1,00	1,11	1,13	1,13	1,17	1,16
Varianza	0,01196	0,00735	0,00289	0,00000	0,00302	0,00263	0,00506	0,00273	0,00437
D. Típica	0,10937	0,08571	0,05376	0,00000	0,05492	0,05127	0,07111	0,05224	0,06611
Error (%)	3,03	2,38	1,49	0,00	1,52	1,42	1,97	1,45	1,83
Coeficiente de correlación (global)				0,7237	Coeficiente de correlación (200-750)				0,8851
Valores estadísticos obtenidos para el colectivo 40-49 años en la serie 1 (TCC 4000 K)									
Iluminancia (lx)	150	200	300	500	750	1000	1500	2000	3000
Media	0,80	0,84	0,90	1,00	1,10	1,12	1,15	1,15	1,17
Varianza	0,00506	0,00435	0,00391	0,00000	0,00375	0,00415	0,00470	0,00427	0,00687
D. Típica	0,07115	0,06595	0,06256	0,00000	0,06121	0,06440	0,06853	0,06532	0,08289
Error (%)	1,97	1,83	1,73	0,00	1,70	1,79	1,90	1,81	2,30
Coeficiente de correlación (global)				0,7464	Coeficiente de correlación (200-750)				0,8695
Valores estadísticos obtenidos para el colectivo 40-49 años en la serie 1 (TCC 5000 K)									
Iluminancia (lx)	150	200	300	500	750	1000	1500	2000	3000
Media	0,77	0,80	0,88	1,00	1,07	1,11	1,14	1,13	1,14
Varianza	0,01271	0,00574	0,00423	0,00000	0,00247	0,00927	0,00595	0,00478	0,00763
D. Típica	0,11276	0,07574	0,06506	0,00000	0,04967	0,09626	0,07711	0,06914	0,08733
Error (%)	3,13	2,10	1,80	0,00	1,38	2,67	2,14	1,92	2,42
Coeficiente de correlación (global)				0,6953	Coeficiente de correlación (200-750)				0,8467
Valores estadísticos obtenidos para el colectivo 40-49 años en la serie 2 (TCC 6500 K)									
Iluminancia (lx)	150	200	300	500	750	1000	1500	2000	3000
Media	0,72	0,73	0,83	1,00	1,04	1,11	1,12	1,12	1,13
Varianza	0,01041	0,00567	0,01120	0,00000	0,00110	0,00218	0,00875	0,00385	0,00246
D. Típica	0,10205	0,07528	0,10581	0,00000	0,03312	0,04665	0,09352	0,06203	0,04956
Error (%)	2,83	2,09	2,93	0,00	0,92	1,29	2,59	1,72	1,37
Coeficiente de correlación (global)				0,7124	Coeficiente de correlación (200-750)				0,8645

Capítulo 7. Toma de datos. Desarrollo y análisis de resultados.

Gráfica 7. Incrementos del Índice General de Atención y Percepción (eje vertical) para el colectivo de 40 a 49 años, obtenidos al variar el nivel de iluminación (eje horizontal) para las diferentes calidades de luz empleadas en la toma de datos

d. Resultados obtenidos para el colectivo de 50 a 69 años.

La tendencia descrita en el epígrafe anterior se consolida, con algunas variaciones, para el colectivo de 50 a 59 años. Por una parte, la región central, de máxima pendiente y valor superior para el coeficiente de Pearson, se desarrolla entre los 300 y los 1000 lx para las cuatro temperaturas de color correlacionadas. Por encima de este valor, el índice de atención analizado no experimenta variaciones significativas. En relación al límite inferior, resulta más complicado apreciar el mismo en este colectivo como consecuencia de la elevada dispersión de los datos obtenidos para bajos niveles de iluminación. Esta dispersión es, probablemente, consecuencia del deterioro variable que experimenta el sistema visual en los términos descritos con anterioridad.

En relación al colectivo de 60-69 años, cabe destacar que, una vez más, se desplaza el límite superior de la región central, que es sensiblemente más pronunciada que en el caso anterior, hasta alcanzar los 1500 lx.

El desplazamiento sostenido del límite superior detectado a lo largo de las sucesivas series puede identificarse como el valor óptimo para el desarrollo de las funciones perceptivas en cada uno de los colectivos. Por encima de estos valores, los incrementos obtenidos en el IGAP no resultan significativos, en relación a los costes económicos³ que se asumen.

³ Resulta oportuno recordar que, al igual que otros procesos perceptivos, la escala de referencia para las recomendaciones normativas tiene carácter logarítmico. Consecuentemente, el esquema de valores de iluminancia aplicado implica un incremento lineal de las capacidades visuales, pero lleva asociado un incremento exponencial en el consumo energético. Así, por ejemplo, es posible elevar un punto el nivel de iluminación pasando de 200 lx a 300 lx; o pasando de 2000lx a 3000 lx; sin embargo, los incrementos energéticos asociados a las dos situaciones no guardan la misma relación en ambos casos.

Tabla 42. *Parámetros estadísticos relativos al incremento experimentado por el IGAP al modificar los niveles de iluminación manteniendo fija la temperatura de color para el colectivo de entre 50 y 59 años de edad (referenciados al IGAP obtenido para 500 lx).*

Valores estadísticos obtenidos para el colectivo 50-59 años en la serie 1(TCC 3000 K)									
Iluminancia (lx)	150	200	300	500	750	1000	1500	2000	3000
Media	0,75	0,77	0,85	1,00	1,11	1,18	1,20	1,22	1,21
Varianza	0,01568	0,01109	0,01366	0,00000	0,00423	0,01205	0,01206	0,00548	0,00723
D. Típica	0,12521	0,10529	0,11686	0,00000	0,06501	0,10977	0,10981	0,07405	0,08502
Error (%)	3,13	2,63	2,92	0,00	1,62	2,74	2,74	1,85	2,12
Coeficiente de correlación (global)				0,7188	Coeficiente de correlación (300-1000)				0,8200
Valores estadísticos obtenidos para el colectivo 50-59 años en la serie 1 (TCC 4000 K)									
Iluminancia (lx)	150	200	300	500	750	1000	1500	2000	3000
Media	0,73	0,74	0,83	1,00	1,09	1,16	1,17	1,20	1,19
Varianza	0,01516	0,01123	0,01457	0,00000	0,00222	0,00862	0,00963	0,00193	0,00451
D. Típica	0,12311	0,10596	0,12070	0,00000	0,04713	0,09285	0,09813	0,04390	0,06718
Error (%)	3,08	2,65	3,02	0,00	1,18	2,32	2,45	1,10	1,68
Coeficiente de correlación (global)				0,7288	Coeficiente de correlación (300-1000)				0,8302
Valores estadísticos obtenidos para el colectivo 50-59 años en la serie 1 (TCC 5000 K)									
Iluminancia (lx)	150	200	300	500	750	1000	1500	2000	3000
Media	0,71	0,73	0,82	1,00	1,08	1,16	1,17	1,18	1,18
Varianza	0,01443	0,00577	0,02017	0,00000	0,00118	0,00591	0,00794	0,00177	0,00705
D. Típica	0,12012	0,07597	0,14202	0,00000	0,03441	0,07686	0,08912	0,04207	0,08396
Error (%)	3,00	1,90	3,55	0,00	0,86	1,92	2,23	1,05	2,10
Coeficiente de correlación (global)				0,7190	Coeficiente de correlación (300-1000)				0,8204
Valores estadísticos obtenidos para el colectivo 50-59 años en la serie 2 (TCC 6500 K)									
Iluminancia (lx)	150	200	300	500	750	1000	1500	2000	3000
Media	0,67	0,72	0,80	1,00	1,05	1,12	1,11	1,13	1,12
Varianza	0,01238	0,00490	0,00799	0,00000	0,00243	0,00193	0,00881	0,00413	0,00271
D. Típica	0,11128	0,06999	0,08940	0,00000	0,04928	0,04392	0,09388	0,06424	0,05210
Error (%)	2,78	1,75	2,23	0,00	1,23	1,10	2,35	1,60	1,30
Coeficiente de correlación (global)				0,7026	Coeficiente de correlación (300-1000)				0,8454

Gráfica 8. Incrementos del Índice General de Atención y Percepción (eje vertical) para el colectivo de 50 a 59 años, obtenidos al variar el nivel de iluminación (eje horizontal) para las diferentes calidades de luz empleadas en la toma de datos

Tabla 43. Parámetros estadísticos relativos al incremento experimentado por el IGAP al modificar los niveles de iluminación manteniendo fija la temperatura de color para el colectivo de entre 60 y 69 años de edad (referenciados al IGAP obtenido para 500 lx).

Valores estadísticos obtenidos para el colectivo 60-69 años en la serie 1(TCC 3000 K)									
Iluminancia (lx)	150	200	300	500	750	1000	1500	2000	3000
Media	0,63	0,63	0,73	1,00	1,11	1,20	1,38	1,37	1,37
Varianza	0,01533	0,01158	0,03005	0,00000	0,00474	0,01208	0,01040	0,01640	0,01733
D. Típica	0,12379	0,10760	0,17335	0,00000	0,06887	0,10989	0,10200	0,12806	0,13164
Error (%)	2,84	2,47	3,97	0,00	1,58	2,52	2,34	2,93	3,02
Coeficiente de correlación (global)				0,7915	Coeficiente de correlación (300-1500)				0,8529
Valores estadísticos obtenidos para el colectivo 60-69 años en la serie 1 (TCC 4000 K)									
Iluminancia (lx)	150	200	300	500	750	1000	1500	2000	3000
Media	0,61	0,62	0,73	1,00	1,11	1,20	1,38	1,37	1,37
Varianza	0,01328	0,01115	0,02910	0,00000	0,00474	0,01208	0,01040	0,01640	0,01733
D. Típica	0,11523	0,10560	0,17059	0,00000	0,06887	0,10989	0,10200	0,12806	0,13164
Error (%)	2,64	2,42	3,91	0,00	1,58	2,52	2,34	2,93	3,02
Coeficiente de correlación (global)				0,7910	Coeficiente de correlación (300-1500)				0,8507
Valores estadísticos obtenidos para el colectivo 60-69 años en la serie 1 (TCC 5000 K)									
Iluminancia (lx)	150	200	300	500	750	1000	1500	2000	3000
Media	0,58	0,61	0,71	1,00	1,09	1,19	1,35	1,33	1,36
Varianza	0,01635	0,01268	0,02792	0,00000	0,00505	0,01185	0,01538	0,02154	0,01605
D. Típica	0,12788	0,11263	0,16711	0,00000	0,07108	0,10887	0,12401	0,14676	0,12670
Error (%)	2,93	2,58	3,83	0,00	1,63	2,49	2,84	3,36	2,90
Coeficiente de correlación (global)				0,7894	Coeficiente de correlación (300-1500)				0,8405
Valores estadísticos obtenidos para el colectivo 60-69 años en la serie 2 (TCC 6500 K)									
Iluminancia (lx)	150	200	300	500	750	1000	1500	2000	3000
Media	0,54	0,59	0,71	1,00	1,08	1,18	1,33	1,32	1,33
Varianza	0,00296	0,01481	0,02825	0,00000	0,00389	0,01233	0,01447	0,01818	0,01692
D. Típica	0,05442	0,12170	0,16808	0,00000	0,06234	0,11102	0,12028	0,13484	0,13006
Error (%)	1,25	2,79	3,85	0,00	1,43	2,54	2,76	3,09	2,98
Coeficiente de correlación (global)				0,7816	Coeficiente de correlación (300-1500)				0,8321

Gráfica 9. Incrementos del Índice General de Atención y Percepción (eje vertical) para el colectivo de 60 a 69 años, obtenidos al variar el nivel de iluminación (eje horizontal) para las diferentes calidades de luz empleadas en la toma de datos

7.3.2 Datos de la serie 2. Variación de la Temperatura de color.

El tratamiento de los datos obtenidos en la serie 2 difiere del descrito en el caso anterior como consecuencia del carácter cualitativo de esta última serie. Las gráficas 9 a 18 recogen los valores medios de las sesiones correspondientes a cada nivel de iluminación. Los parámetros estadísticos básicos (media, varianza, desviación típica y error), calculados por medios informáticos, están recogidos en la tabla 44. De estos valores cabe destacar el incremento del error para las poblaciones de, mayor edad y los niveles de iluminación más bajos; si bien se mantiene dentro de los valores considerados en la determinación de la muestra. Este incremento del error es consecuencia de la mayor dispersión de los resultados individuales para estas combinaciones.

Asimismo, resulta reseñable que los valores obtenidos, con niveles de iluminación por encima de 1500 lx, para el incremento del índice de atención son independientes de la temperatura de color. De la misma forma, los dos parámetros resultan independientes para los dos colectivos poblacionales de menor edad.

Sin embargo, en los tres colectivos poblacionales de mayor edad se manifiesta una vinculación entre ambos parámetros que se incrementa sensiblemente al disminuir el nivel de iluminación. Esta vinculación se manifiesta en una reducción de las puntuaciones obtenidas en el IGAP al emplear temperaturas de color con más proporción de radiación en longitudes onda cortas. La tendencia comienza a manifestarse en el colectivo de 60-69 años al bajar la iluminancia a 1500 lx, intensificándose al continuar bajando los niveles. El proceso descrito también se aprecia, aunque con menos intensidad, en el colectivo de 50-59 años al bajar el nivel de iluminación a 1000 lx, y en el colectivo de 40-49 años al bajar la iluminancia a 750 lx.

Gráfica 10. Incrementos del Índice General de Atención y Percepción (eje vertical) obtenidos al variar la temperatura de color correlacionada (eje horizontal) con 3000 lx de iluminancia.

Gráfica 11. Incrementos del Índice General de Atención y Percepción (eje vertical) obtenidos al variar la temperatura de color correlacionada (eje horizontal) con 2000 lx de iluminancia.

Gráfica 12. Incrementos del Índice General de Atención y Percepción (eje vertical) obtenidos al variar la temperatura de color correlacionada (eje horizontal) con 1500 lx de iluminancia.

Gráfica 13. Incrementos del Índice General de Atención y Percepción (eje vertical) obtenidos al variar la temperatura de color correlacionada (eje horizontal) con 1000 lx de iluminancia

Gráfica 14. Incrementos del Índice General de Atención y Percepción (eje vertical) obtenidos al variar la temperatura de color correlacionada (eje horizontal) con 750 lx de iluminancia

Gráfica 15. Incrementos del Índice General de Atención y Percepción (eje vertical) obtenidos al variar la temperatura de color correlacionada (eje horizontal) con 500 lx de iluminancia

Gráfica 16. Incrementos del Índice General de Atención y Percepción (eje vertical) obtenidos al variar la temperatura de color correlacionada (eje horizontal) con 300 lx de iluminancia

Gráfica 17. Incrementos del Índice General de Atención y Percepción (eje vertical) obtenidos al variar la temperatura de color correlacionada (eje horizontal) con 200 lx de iluminancia

Gráfica 18. Incrementos del Índice General de Atención y Percepción (eje vertical) obtenidos al variar la temperatura de color correlacionada (eje horizontal) con 150 lx de iluminancia

Tabla 44. Parámetros estadísticos relativos al incremento experimentado por el IGAP al modificar la temperatura de color correlacionada manteniendo fijo el nivel de iluminación (referenciado al IGAP obtenido para 4000 K).

3000 lx	Colectivo 20-29 años				Colectivo 30-39 años				Colectivo 40-49 años				Colectivo 50-59 años				Colectivo 60-69 años							
TCC (K)	3000	4000	5000	6500	3000	4000	5000	6500	3000	4000	5000	6500	3000	4000	5000	6500	3000	4000	5000	6500	3000	4000	5000	6500
Media	0.99	1.00	1.02	1.01	1.01	1.00	0.99	0.98	0.98	1.00	1.02	0.98	1.00	1.00	1.01	0.99	1.00	1.00	1.03	0.99	1.03	1.00	1.02	1.01
Varianza	0.0028	0.0000	0.0039	0.0029	0.0029	0.0000	0.0039	0.0031	0.0028	0.0000	0.0022	0.0007	0.0013	0.0000	0.0027	0.0034	0.0003	0.0000	0.0027	0.0034	0.0000	0.0013	0.0031	
D.Típica	0.0524	0.0000	0.0626	0.0541	0.0535	0.0000	0.0626	0.0555	0.0528	0.0000	0.0471	0.0269	0.0354	0.0000	0.0521	0.0580	0.0000	0.0000	0.0521	0.0580	0.0000	0.0366	0.0555	
Error (%)	1.7459	0.0000	2.0858	1.8006	1.6110	0.0000	1.8851	1.6724	1.4638	0.0000	1.3067	0.7449	0.8832	0.0000	1.3026	1.4483	1.3727	0.0000	1.2192	1.8465				
2000 lx	Colectivo 20-29 años				Colectivo 30-39 años				Colectivo 40-49 años				Colectivo 50-59 años				Colectivo 60-69 años							
TCC (K)	3000	4000	5000	6500	3000	4000	5000	6500	3000	4000	5000	6500	3000	4000	5000	6500	3000	4000	5000	6500	3000	4000	5000	6500
Media	1.02	1.00	1.01	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.01	0.99	1.00	1.00	1.01	0.97	1.03	1.00	1.02	0.99	1.03	1.00	1.02	0.99
Varianza	0.0015	0.0000	0.0052	0.0041	0.0051	0.0000	0.0027	0.0047	0.0053	0.0000	0.0025	0.0021	0.0013	0.0000	0.0054	0.0026	0.0040	0.0000	0.0012	0.0033	0.0000	0.0012	0.0033	
D.Típica	0.0388	0.0000	0.0719	0.0641	0.0712	0.0000	0.0524	0.0689	0.0727	0.0000	0.0503	0.0462	0.0354	0.0000	0.0733	0.0515	0.0631	0.0000	0.0349	0.0574	0.0000	0.0349	0.0574	
Error (%)	1.2911	0.0000	2.3952	2.1328	2.1443	0.0000	1.5784	2.0754	2.0145	0.0000	1.3933	1.2819	0.8832	0.0000	1.8312	1.2856	1.4469	0.0000	1.1616	1.9122				
1500 lx	Colectivo 20-29 años				Colectivo 30-39 años				Colectivo 40-49 años				Colectivo 50-59 años				Colectivo 60-69 años							
TCC (K)	3000	4000	5000	6500	3000	4000	5000	6500	3000	4000	5000	6500	3000	4000	5000	6500	3000	4000	5000	6500	3000	4000	5000	6500
Media	1.02	1.00	1.03	1.00	1.02	1.00	1.03	1.02	1.01	1.00	1.02	0.99	1.02	1.00	0.99	0.96	1.06	1.00	0.95	0.94	1.06	1.00	0.95	0.94
Varianza	0.0019	0.0000	0.0053	0.0042	0.0050	0.0000	0.0081	0.0052	0.0055	0.0000	0.0024	0.0037	0.0010	0.0000	0.0087	0.0032	0.0026	0.0000	0.0042	0.0044	0.0000	0.0042	0.0044	
D.Típica	0.0432	0.0000	0.0726	0.0650	0.0709	0.0000	0.0898	0.0723	0.0738	0.0000	0.0495	0.0608	0.0314	0.0000	0.0935	0.0566	0.0511	0.0000	0.0651	0.0661	0.0000	0.0651	0.0661	
Error (%)	1.4392	0.0000	2.4166	2.1624	2.1354	0.0000	2.7063	2.1798	2.0469	0.0000	1.3717	1.6856	0.7844	0.0000	2.3359	1.4128	1.1706	0.0000	2.1658	2.2016				
1000 lx	Colectivo 20-29 años				Colectivo 30-39 años				Colectivo 40-49 años				Colectivo 50-59 años				Colectivo 60-69 años							
TCC (K)	3000	4000	5000	6500	3000	4000	5000	6500	3000	4000	5000	6500	3000	4000	5000	6500	3000	4000	5000	6500	3000	4000	5000	6500
Media	1.00	1.00	1.04	0.99	1.00	1.00	1.04	1.00	1.03	1.00	0.98	0.99	1.03	1.00	0.92	0.93	1.07	1.00	0.94	0.93	1.07	1.00	0.94	0.93
Varianza	0.0022	0.0000	0.0051	0.0034	0.0051	0.0000	0.0095	0.0047	0.0043	0.0000	0.0039	0.0037	0.0003	0.0000	0.0054	0.0006	0.0013	0.0000	0.0050	0.0042	0.0000	0.0050	0.0042	
D.Típica	0.0472	0.0000	0.0711	0.0585	0.0712	0.0000	0.0973	0.0689	0.0657	0.0000	0.0622	0.0608	0.0173	0.0000	0.0736	0.0250	0.0356	0.0000	0.0705	0.0645	0.0000	0.0705	0.0645	
Error (%)	1.5701	0.0000	2.3673	1.9481	2.1443	0.0000	2.9313	2.0754	1.8198	0.0000	1.7242	1.6856	0.4316	0.0000	1.8376	0.6245	0.8155	0.0000	2.3478	2.1468				
750 lx	Colectivo 20-29 años				Colectivo 30-39 años				Colectivo 40-49 años				Colectivo 50-59 años				Colectivo 60-69 años							
TCC (K)	3000	4000	5000	6500	3000	4000	5000	6500	3000	4000	5000	6500	3000	4000	5000	6500	3000	4000	5000	6500	3000	4000	5000	6500
Media	1.02	1.00	1.02	1.00	0.97	1.00	1.04	0.99	1.04	1.00	0.94	0.96	1.03	1.00	0.90	0.91	1.07	1.00	0.93	0.92	1.07	1.00	0.93	0.92
Varianza	0.0016	0.0000	0.0049	0.0029	0.0052	0.0000	0.0080	0.0048	0.0012	0.0000	0.0056	0.0033	0.0003	0.0000	0.0071	0.0007	0.0013	0.0000	0.0053	0.0038	0.0000	0.0053	0.0038	
D.Típica	0.0403	0.0000	0.0696	0.0536	0.0724	0.0000	0.0886	0.0694	0.0352	0.0000	0.0751	0.0575	0.0186	0.0000	0.0845	0.0261	0.0358	0.0000	0.0728	0.0620	0.0000	0.0728	0.0620	
Error (%)	1.3421	0.0000	2.3186	1.7832	2.1827	0.0000	2.6988	2.0924	0.9764	0.0000	2.0818	1.5938	0.4655	0.0000	2.1119	0.6517	0.8210	0.0000	2.4249	2.0655

Capítulo 7. Toma de datos. Desarrollo y análisis de resultados.

Tabla 44. Parámetros estadísticos relativos al incremento experimentado por el IGAP al modificar la temperatura de color correlacionada manteniendo fijo el nivel de iluminación (referenciado al IGAP obtenido para 4000 K). (Cont.)

500 lx	Colectivo 20-29 años					Colectivo 30-39 años					Colectivo 40-49 años					Colectivo 50-59 años					Colectivo 60-69 años				
	3000	4000	5000	6500		3000	4000	5000	6500		3000	4000	5000	6500		3000	4000	5000	6500		3000	4000	5000	6500	
TCC (K)	1,03	1,00	1,02	0,97		0,95	1,00	1,02	0,98		1,05	1,00	0,93	0,95		1,07	1,00	0,92	0,90		1,08	1,00	0,91	0,88	
Media	0,0010	0,0000	0,0067	0,0022		0,0045	0,0000	0,0095	0,0038		0,0039	0,0000	0,0031	0,0020		0,0050	0,0000	0,0070	0,0009		0,0024	0,0000	0,0072	0,0087	
Varianza	0,0319	0,0000	0,0817	0,0466		0,0670	0,0000	0,0975	0,0615		0,0624	0,0000	0,0554	0,0445		0,0708	0,0000	0,0834	0,0303		0,0492	0,0000	0,0849	0,0933	
D.Típica	1,0612	0,0000	2,7211	1,5530		2,0188	0,0000	2,9369	1,8527		1,7306	0,0000	1,5357	1,2345		1,7684	0,0000	2,0826	0,7572		1,1281	0,0000	2,8252	3,1046	
Error (%)																									
300 lx	Colectivo 20-29 años					Colectivo 30-39 años					Colectivo 40-49 años					Colectivo 50-59 años					Colectivo 60-69 años				
	3000	4000	5000	6500		3000	4000	5000	6500		3000	4000	5000	6500		3000	4000	5000	6500		3000	4000	5000	6500	
TCC (K)	1,02	1,00	1,02	0,96		1,01	1,00	1,01	0,97		1,04	1,00	0,92	0,92		1,06	1,00	0,92	0,90		1,09	1,00	0,88	0,85	
Media	0,0011	0,0000	0,0073	0,0021		0,0045	0,0000	0,0102	0,0021		0,0031	0,0000	0,0041	0,0057		0,0063	0,0000	0,0070	0,0009		0,0023	0,0000	0,0126	0,0091	
Varianza	0,0338	0,0000	0,0855	0,0453		0,0673	0,0000	0,1011	0,0463		0,0559	0,0000	0,0640	0,0757		0,0793	0,0000	0,0834	0,0303		0,0483	0,0000	0,1122	0,0952	
D.Típica	1,1261	0,0000	2,8453	1,5096		2,0294	0,0000	3,0468	1,3952		1,5499	0,0000	1,7744	2,0976		1,9806	0,0000	2,0826	0,7572		1,1068	0,0000	3,7338	3,1679	
Error (%)																									
200 lx	Colectivo 20-29 años					Colectivo 30-39 años					Colectivo 40-49 años					Colectivo 50-59 años					Colectivo 60-69 años				
	3000	4000	5000	6500		3000	4000	5000	6500		3000	4000	5000	6500		3000	4000	5000	6500		3000	4000	5000	6500	
TCC (K)	1,03	1,00	0,97	0,99		1,00	1,00	0,97	0,97		1,05	1,00	0,89	0,91		1,06	1,00	0,83	0,88		1,10	1,00	0,87	0,86	
Media	0,0008	0,0000	0,0025	0,0058		0,0039	0,0000	0,0026	0,0019		0,0029	0,0000	0,0046	0,0064		0,0063	0,0000	0,0146	0,0067		0,0030	0,0000	0,0130	0,0104	
Varianza	0,0277	0,0000	0,0502	0,0758		0,0624	0,0000	0,0513	0,0434		0,0540	0,0000	0,0682	0,0798		0,0793	0,0000	0,1207	0,0821		0,0551	0,0000	0,1142	0,1019	
D.Típica	0,9231	0,0000	1,6729	2,5246		1,8791	0,0000	1,5463	1,3067		1,4963	0,0000	1,8896	2,2117		1,9806	0,0000	3,0157	2,0515		1,2625	0,0000	3,8024	3,3934	
Error (%)																									
150 lx	Colectivo 20-29 años					Colectivo 30-39 años					Colectivo 40-49 años					Colectivo 50-59 años					Colectivo 60-69 años				
	3000	4000	5000	6500		3000	4000	5000	6500		3000	4000	5000	6500		3000	4000	5000	6500		3000	4000	5000	6500	
TCC (K)	0,98	1,00	0,97	0,98		1,01	1,00	0,98	0,96		1,04	1,00	0,88	0,88		1,09	1,00	0,86	0,89		1,09	1,00	0,89	0,87	
Media	0,0014	0,0000	0,0015	0,0050		0,0029	0,0000	0,0026	0,0009		0,0042	0,0000	0,0044	0,0058		0,0062	0,0000	0,0135	0,0039		0,0025	0,0000	0,0120	0,0117	
Varianza	0,0371	0,0000	0,0390	0,0707		0,0543	0,0000	0,0506	0,0294		0,0645	0,0000	0,0667	0,0761		0,0785	0,0000	0,1163	0,0622		0,0502	0,0000	0,1097	0,1082	
D.Típica	1,2350	0,0000	1,2980	2,3542		1,6349	0,0000	1,5246	0,8857		1,7868	0,0000	1,8489	2,1080		1,9608	0,0000	2,9046	1,5548		1,1504	0,0000	3,6519	3,6033	
Error (%)

CAPÍTULO 8.

CONCLUSIONES

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES.

8.1 Conclusiones en relación al actual sistema fotométrico

El estudio de la naturaleza interna del sistema fotométrico pone de manifiesto ciertas limitaciones del mismo a la hora de modelizar la magnitud de las sensaciones visuales asociadas a un determinado estímulo externo. Estas limitaciones son una consecuencia, en primer lugar, de los fundamentos sobre los que se articula el propio sistema y de las metodologías empleadas en su elaboración; y, en segundo lugar, de las diferencias que se advierten al considerar la sensación experimentada por diferentes observadores de manera individual.

Como se ha discutido en el capítulo 5, la fotometría trata de establecer los efectos visuales de la radiación electromagnética conforme a una función de eficiencia espectral relativa. Sin embargo, ninguno de estos dos conceptos permite cuantificar el efecto visual que un mismo estímulo genera en diferentes observadores: Las magnitudes radiométricas permiten medir en términos absolutos las energías asociadas a un determinado haz de “luz”, pero se trata de

un concepto físico independiente de las cualidades del observador. La función de eficiencia luminosa relativa, por su lado, tampoco permite valorar los efectos visuales de la radiación en términos absolutos, puesto que responde a un análisis introspectivo de la sensación que experimenta cada individuo. En otras palabras, nos indica la magnitud de la sensación a las diferentes longitudes de onda experimentada por cada observador, pero referenciándola a su propia experiencia interna. La metodología empleada para elaborar la función permite, por tanto, establecer cuál es la longitud de onda a la que diferentes observadores presentan una mayor sensibilidad, pero no determinar si la respuesta visual de estos observadores ante el mismo estímulo es más o menos intensa.

Asimismo, existen muchas incógnitas en relación a las limitaciones de este sistema y los conceptos físicos y psicofísicos implicados en el mismo:

- La metodología empleada para elaborar la función de sensibilidad (comparación de brillos de campos adyacentes y fotometría de parpadeo) valora la eficiencia de los procesos visuales considerando el umbral de discriminación del efecto de brillo. Sin embargo, no permite valorar otras capacidades del sistema perceptivo como la agudeza visual o la percepción de contornos. No todos los procesos visuales pueden estudiarse analizando la capacidad de discriminar estímulos monocromáticos de brillo equivalente. Así, por ejemplo, la lectura de textos está basada en el elevado contraste entre los símbolos y el fondo que, por otra parte, es generada por el efecto de haces de luz heterocromáticos. Asimismo, resulta conveniente recordar que, con el paso del tiempo, los medios oculares experimentan un deterioro complejo que no se limita a una variación homogénea de la cantidad de luz que alcanza el plano de la retina, por lo que, consecuentemente, la calidad cromática de la luz empleada puede afectar sensiblemente a estas capacidades.

- En el proceso de toma de datos sobre el que se elabora la curva se imponen diversas restricciones metodológicas que no se corresponden con las situaciones reales en las que se desarrollan los procesos perceptivos. Así, por ejemplo, los parámetros de contorno en que se lleva a cabo la toma de datos responden a condiciones de laboratorio muy concretas y extremadamente restrictivas. La modificación de estas condiciones afecta sensiblemente a la función resultante. La curva empleada en la fotometría fotópica corresponde a un ángulo subtendido de 2° , con unos niveles de luminancia aparentemente fotópicos¹ y en ausencia de estímulos perimetrales. Estas condiciones difieren sensiblemente de las que circunscriben los procesos cotidianos, en los que, por ejemplo, resulta imposible suprimir los estímulos generados fuera de la región foveal. Consecuentemente, pueden manifestarse fenómenos de dispersión y luminiscencia intraocular que no son tomados en consideración por el sistema fotométrico.
- Existen diferencias entre la luminancia (magnitud física) y el brillo (sensación psicofísica). Concretamente, no está demostrado que la sensación de brillo responda a la ley de aditividad, por lo que la sensación producida por un conjunto de radiaciones no puede ser modelizada basándonos en la adición de los estímulos producidos por las radiaciones monocromáticas empleadas durante el proceso de elaboración de la curva.

¹ De los resultados de algunas investigaciones (Trezona, 1983; Viikari et Al., 2005), parece deducirse que los dispositivos empleados durante la toma de datos conllevan una reducción de la cantidad de luz que alcanza el ojo, y trasladan los valores de luminancia a la región mesópica.

8.2 Conclusiones en relación a las recomendaciones normativas.

Las limitaciones del sistema fotométrico que se han indicado en el epígrafe anterior quedan patentes al analizar la intensidad y la calidad de la imagen que se forma en la retina de observadores que pertenecen a diferentes colectivos de edad. Parece razonable suponer que, si la intensidad de la imagen registrada disminuye, como consecuencia de las alteraciones que experimentan los medios oculares, en uno de los colectivos; resultará necesario incrementar la luminancia del estímulo distante (en la superficie observada) para compensar de esta manera la devaluación sufrida por el estímulo próximo (en la retina del observador). Esta suposición se confirma al analizar los resultados obtenidos en la primera serie de la toma de datos, que indican que el nivel de iluminación que permite optimizar los procesos perceptivos es variable y se incrementa con la edad. Las tendencias observadas en la fase experimental resultan congruentes con las determinadas en el análisis de la imagen retinal. Asimismo, los resultados obtenidos en las pruebas de lectoescritura son coherentes con los obtenidos en los test Toulouse-Pieron.

Conforme a los resultados obtenidos en la toma de datos, el nivel de iluminación, 500 lx, empleado en la actualidad para el diseño de los sistemas de iluminación de oficinas, sólo resulta óptimo para los dos colectivos de menor edad; e incluso entre estos encontramos pequeñas diferencias. Así, en el colectivo de observadores de 30-39 años, se aprecia una mejora en la eficiencia de los procesos perceptivos de un 5% al incrementar el nivel de iluminación de 500 lx hasta 750 lx. Para los demás colectivos, la optimización de estos procesos requiere niveles de iluminación superiores; resultando necesario incrementar las recomendaciones normativas en un escalón por década, conforme a los valores definidos por la norma EN-12665:2018. Para el colectivo de entre 40 y 49 años, los procesos perceptivos se optimizan en torno a un 10% al incrementar el nivel de iluminación hasta 750 lx. De la misma forma, el colectivo de 50 a 59 años

aumenta la eficiencia un 18 % para iluminancias de 1000 lx; y el de 60-69 años lo hace en un 38% para niveles de iluminación de 1500 lx.

Se ha contrastado, asimismo, que estos incrementos no son independientes de la calidad cromática de la fuente luminosa empleada en el sistema de iluminación. Esta relación parece ser una consecuencia, cuando menos en parte, de ciertas alteraciones dependientes de la longitud de onda que experimentan los medios oculares con la edad y que ya han sido discutidas en el capítulo 6. Tal es caso de la pérdida de transmitancia del cristalino o los efectos de dispersión y fotoluminiscencia intraoculares. También en este caso, las tendencias observadas en la fase experimental resultan congruentes con las determinadas en el análisis de la imagen retinal.

En los dos colectivos de menor edad, entre 20 y 39 años, no se ha observado relación entre la calidad cromática de la fuente luminosa empleada y la eficiencia de los procesos perceptivos. Sin embargo, a partir de los 40 años comienza a apreciarse una ligera tendencia que implica una optimización de los procesos perceptivos mediante el empleo de las dos fuentes luminosas de menor temperatura de color correlacionada. Esta tendencia es mayor para niveles de iluminación bajos.

La relación descrita se intensifica sensiblemente con la edad. En el caso del colectivo de 50 a 59 años, no se aprecia dependencia, o esta es mínima, con niveles de iluminación muy altos ($E \geq 1500$ lx); pero, para niveles inferiores los procesos perceptivos se pueden optimizar en torno a un 10% empleando fuentes luminosas con temperaturas de color correlacionadas de 4000 K o inferiores. Para el colectivo de 60 a 69 años, la optimización de los procesos perceptivos demanda temperaturas de color correlacionadas inferiores a los 4000 K si los niveles de iluminación están por debajo de los 2000 lx.

8.3 Propuesta de recomendaciones a incluir en el texto normativo

La naturaleza interna de la función de sensibilidad espectral implica que esta función, sobre la que se asienta el sistema fotométrico, no recoge información sobre la magnitud real de los estímulos visuales. Esta afirmación se cumple para todos los colectivos de forma general, pero más específicamente para aquellos que no fueron tomados en consideración en el proceso de elaboración de la función y que, por otra parte, presentan una mayor diversidad en las características de sus sistemas visuales.

Tomando en consideración las diferencias físicas que presentan los componentes ópticos del sistema visual de los diferentes colectivos, podemos afirmar que la función de sensibilidad espectral no tiene carácter universal y que, consecuentemente, la variación experimentada en la eficiencia de los procesos visuales no está correctamente interpretada por la fotometría. Se trata de un sistema físico que permite valorar la cantidad de energía radiante ponderada conforme a una función de carácter relativo; pero que no es representativa de la forma en que se desarrollan los procesos visuales a nivel individual.

Asumida, como consecuencia de las fuertes divergencias individuales, la imposibilidad de establecer un sistema capaz de modelizar la intensidad de los estímulos visuales de forma universal; se propone la aplicación al actual sistema normativo de un baremo que permita optimizar el desarrollo de las tareas básicas del uso administrativo a los colectivos de diferentes edades. Este baremo debe establecer, por una parte, los niveles de iluminación recomendados en cada caso, así como las características cromáticas óptimas de las fuentes luminosas empleadas en cada caso (tabla 46).

Tabla 45. Niveles de iluminación (lx) y temperaturas de color correlacionadas (K) recomendados para el desarrollo de las tareas básicas del uso administrativo.

Edad	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69
Iluminancia recomendada	500 lx	500-750 lx	750 lx	1000 lx	1500 lx
Temperatura de color correlacionada	-	-	≤ 4000 K	≤ 4000 K	≤ 3300 K

Asimismo, y dado que no resulta posible cumplir con los diferentes criterios de forma simultánea, parece razonable incorporar a los textos normativos la recomendación de emplear sistemas de iluminación combinados; en los cuales coexisten un sistema de iluminación general, que aporta niveles de base a todo el plano de trabajo, y sistemas de iluminación puntuales en cada uno de los puestos que permitan el control individualizado de las condiciones de iluminación (Light on Demand).

El modelo planteado resulta compatible con las exigencias energéticas y de salubridad establecidas por otras normativas. Así, por ejemplo, el control de la relación entre el flujo luminoso y la superficie iluminada resulta mucho más preciso, y consecuentemente más eficiente, en los sistemas de iluminación puntual que en los habituales sistemas de iluminación general. Este tipo de sistemas, permiten, por otra parte, una vinculación más precisa entre el consumo de las luminarias y la permanencia de los usuarios en el puesto de trabajo mediante el empleo de dispositivos de control de presencia.

Consecuentemente, se propone la incorporación de la tabla 46 de este documento en el epígrafe 4.3.3 de la norma UNE-EN 12464-1:2012, en relación a los valores válidos para condiciones visuales normales; así como la modificación de la tabla 5.26 de la misma norma (tabla 47):

Tabla 46. Propuesta de modificación de la tabla 5.26 de la norma UNE-EN 12464-1:2012.

Nº Ref	Tipo de interior, tareas y actividad	E_m lx	UGR _L -	U_0 -	R_a -	Requisitos específicos
5.26.1	Archivo, copias, etc.	300	19	0,40	80	
5.26.2	Escritura, escritura a máquina, lectura, tratamiento de datos	500 a 1500	19	0,60	80	Trabajo en EPV, véase el apartado 4.9 Temperatura de color seleccionable entre 3000 K y 5000 K
5.26.3	Dibujo técnico	750	16	0,70	80	
5.26.4	Puestos de trabajo de CAD	500	19	0,60	80	Trabajo en EPV, véase el apartado 4.9
5.26.5	Salas de conferencias y reuniones	500	19	0,60	80	La iluminación debería ser controlable
5.26.6	Mostrador de recepción	300	22	0,60	80	
5.26.7	Archivos	200	25	0,40	80	
En relación a las tareas básicas del uso oficina especificadas en la referencia 5.26.2, se priorizará el empleo de sistemas de iluminación combinados que permitan a cada uno de los usuarios establecer las condiciones de iluminación de forma independiente. Estos sistemas deberán permitir el control sobre el nivel de iluminación en el plano de trabajo (entre 500 lx y 1500 lx) y la temperatura de color (entre 3000 K y 5000 K).

8.4 Futuras líneas de investigación

Entre las líneas de investigación que pueden aflorar vinculadas al tema de la presente tesis cabe mencionar las siguientes:

- En primer lugar, es pertinente estudiar la manera en las condiciones de iluminación afectan a los procesos cognitivos relacionados con las tareas de lectura y escritura. Esta investigación debe desarrollarse en dos niveles: por una parte, atendiendo a como las condiciones afectan de forma directa a los procesos cognitivos relacionados con el procesamiento de la información aportada por la imagen retinal; por otra parte, atendiendo a la forma en la que el ciclo de iluminación afecta a estos procesos cognitivos, dado que puede existir una relación entre la eficiencia y los ciclos de funcionamiento asociados a la función melanópica y a los aspectos no visuales de la radiación electromagnética.
- En segundo lugar, resulta necesario ampliar del estudio para valorar la interacción de los elementos informáticos con las condiciones de iluminación planteadas en esta investigación. En este sentido, cabe valorar cual es la luminancia óptima de los dispositivos informáticos empleados en relación a los niveles de iluminación y las temperaturas de color aquí planteadas, y a las luminancias que estos niveles generan en las superficies del entorno de trabajo.
- Parece oportuno, asimismo, profundizar en la manera en que otros parámetros de diseño mencionados por las normativas afectan a los diferentes colectivos de edad. Tal es caso de las luminancias generales de los paramentos de la estancia y del mobiliario, las uniformidades exigidas a estas luminancias, o la distribución de

luminancias en el campo visual como consecuencia de la disposición de las ventanas en los espacios de trabajo

- Asimismo, durante el desarrollo de la presente tesis doctoral han surgido otras posibilidades que, si bien no dan continuidad al presente estudio, si abren otras líneas de trabajo interesantes. Por una parte, se ha contactado con el Instituto de Ciencias de la Educación de la Universidad Politécnica de Madrid y se está planteando la posibilidad de valorar la optimización de la actividad de los estudiantes mediante el empleo de sistemas de iluminación que permitan el control individualizado de las condiciones de trabajo. Por otra parte, se ha iniciado un estudio relativo a las condiciones ambientales que permiten optimizar los entrenamientos deportivos en instalaciones de interior.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA.

- Ångström, K. (1902). The mechanical equivalent of the unit of light. *The Astrophysical Journal*, 15, 223. doi:10.1086/140910
- ANSI/IES (2007). *Lighting and the visual environment for senior living. Recommended Practice ANSI/IES RP-28-07*. Illuminating Engineering Society.
- ANSI/IES (2012). *American National Standards Practise for Office Lighting. Recommended Practice ANSI/IES RP-1-12*. Illuminating Engineering Society
- Anstis, S., Cavanagh, P., Maurer, D. & Lewis, T. (1986). Early maturation of luminous efficiency for colored stimuli. *Investigative Ophthalmology and Visual Science (Suppl.)*, 27, 264.
- Arias, E., Xu, J., & Kochanek, K. D. (2019). United states life tables, 2016. *National Vital Statistics Reports From the Centers for Disease Control and Prevention, National Center for Health Statistics, National Vital Statistics System*, 68(4), 1-66.
- Aries, M., Veitch, J. A., & Newsham, G. R. (2010). Physical and psychological discomfort in the office environment. *Lighting* , 1-6

- Berman, S., Navvab, M., Martin, M., Sheedy, J., & Tithof, W. (2006). A comparison of traditional and high colour temperature lighting on the near acuity of elementary school children. *Lighting Research & Technology*, 38(1), 41-49.
- Bieber, M.L., Volbrecht, V.J., Werner, J.S., (1995). Spectral efficiency measured by heterochromatic flicker photometry is similar in human infants and adults. *Vision Research*. 35-10, 1385-1393.
- Blattner, W. (1886). Das optische Nutzeffect der Glühlampen, Fraundfeld.
- Boettner, E.A., Wolter, J.R. (1962). Transmission of the ocular media. *Invest. Ophthalmology*. 1(6), 776-783
- Bouguer, P. (1760). *Traité d'optique sur la gradation de la lumière, ouvrage posthume de M. Bouguer, et publié par M. l'abbé de La Caille*. Paris.
- Boyce, P.R. et al. (2006) *Lighting quality and office work: two field simulation experiments*, *Lighting Research and Technology*, 38, 191-223
- Boyce, P. R. (2014). *Human factors in lighting*. Baton Rouge: CRC Press. doi:10.1201/b16707
- Boynton, R.M., Clarke F.J.J. (1964). Sources of entoptic scatter in the human eye. *Journal of the optical society of America*. 54 (1), 110-119.
- Carnot, Nicolas Léonard Sadi. (1832). *Reflections on the motive power of heat and on machines fitted to develop that power*. edited by R. H. Thurston. (1890)
- Christison, R., & Turner, E. (1825). XXIX. on the comparative advantages of oil and coal gas. *The Philosophical Magazine*, 66(329), 206-210. doi:10.1080/14786442508673949
- CIE (1924) *Commission Internationale de l'Éclairage: Principales décisions à fonction*, CIE proceedings 6th Session 1924, 67-70. Cambridge University Press (Edition 1926).

- CIE (1951) *Commission Internationale de l'Eclairage. CIE Proceedings 12th Session*, Vol B (CIE 11B), 37-39 Stockholm.
- CIE (1963) *Commission Internationale de l'Eclairage. CIE Proceedings 15th Session*, Vol III, 37-3, Vienna. Bureau Central de la CIE. Paris.
- CIE (1990) *Commission Internationale de l'Eclairage 1988 2° Spectral Luminous Efficiency Function for Photopic Vision*. CIE 86. CIE Central Bureau.
- CIE (1995) *Commission Internationale de l'Eclairage, Models of heterochromatic brightness matching*, CIE Collection in Colour and Vision CIE118/2, CIE Central Bureau.
- CIE (2012) *A Computerized Approach to Transmission and Absorption Characteristics of the Human Eye (incl. Erratum 1)*. CIE 203. CIE Central Bureau.
- CIE (2019) *The basis of physical photometry* (2019). (3rd edition). Vienna: CIE Central Bureau.
- Coblentz, W. W., & Emerson, W. B. (1917). *Relative sensibility of the average eye to light of different colors and some practical applications to radiation problems*. Washington: Gov. Pr. Off.
- Crawford, B.H. (1949). The Scotopic Visibility Function. *Physical Society Proceedings*, 62, 321.
- Crew, H. (1898) A provisional list of photometric units. *Astrophysical Journal*. VII, 298. Chicago. The University of Chicago Press.
- Crittenden, E. C., & Richtmyer, F. K. (1917). *An 'average eye' for heterochromatic photometry, and a comparison of a flicker and an equality-of-brightness photometer*. Washington: Gov. Pr. Off. Bulletin of the Bureau of Standards n° 299.
- Crova, M.A. (1878) Étude spectrométrique de quelques sources lumineuses. *Comptes rendus Académie des sciences*, 87, 322

- CTE-DB-HE3 (2017). *Código Técnico de la Edificación. Condiciones de las instalaciones de iluminación*. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.: https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/ahorroEnergia/DccHE_201806.pdf
- CTE-DB-HE3 (2019). *Código Técnico de la Edificación. Condiciones de las instalaciones de iluminación*. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.: <https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/ahorroEnergia/DBHE.pdf>
- CTE-DB-SUA4 (2019). *Código Técnico de la Edificación. Seguridad frente al riesgo por iluminación inadecuada*. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.: <https://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/seguridadUtilizacion/DBSUA.pdf>
- Curcio, C.A., Kimberly, A.A., Kalina, R.E. (1990). Reorganization of the human photoreceptor Mosaic following age-related rod loss. *ARVD Abstracts*, 31, 38.
- Davy, H., & Davy, J. (1839). *The collected works of sir humphry davy, early miscellaneous papers*. London: Smith, Elder and Co. Cornhill.
- Delory, F.C., et al. (1995). In vivo fluorescence of the ocular fundus exhibits retinal pigment epithelium lipofuscin characteristics. *Inv, Ophthalmology. Visual Science*, 36, 718-729.
- DiLaura, D. L. (2011). *The lighting handbook* (10. ed. ed.). New York, NY: Illuminating Engineering Society of North America.
- DIN V 18599:4 (2018) *Energy efficiency of buildings.- Calculation of the net, final and primary energy demand for heating, cooling, ventilation, domestic hot water and lighting- Part 4: Net and final energy demand for lighting*. DIN.
- Dobson, V. (1976). Spectral sensitivity of the 2-month infant as measured by the visually evoked potential. *Vision Research*, 16, 367-374.
- Draper, J. W. (1846). *A text-book on chemistry*. New York: Harper & brothers
- Drysdale, C.V., (1907) On Luminous Efficiency and the Mechanical Equivalent of Light. *Proceedings of the Royal Society of London*, vol.80, 535, 19-25.

- Ebert, H. (1887) Ueber den Einfluss der Schwellenwerthe der Lichtempfindung auf den Charakter der Spectra [Sobre la influencia del valor umbral de la percepción de la luz en el carácter de los espectros]. *Annalen der Physik*, 269 (1), 136.
- EN-12464-1 (2011). *Norma EN-12464-1:2011. Light and lighting. Lighting for work places. Part 1: Indoor Work Places*. CEN/AENOR.
- EN-12665 (2018). *Norma EN-12665:2018. Light and lighting. Basic terms and criterio for specifying lighting requirements*. CEN/AENOR.
- Estadística-Agenda (2019). Edad y permanencia del personal académico. Recurso digital. <http://www.planeacion.unam.mx/Agenda/2019/disco/#>.
- Geerdinck, L. M., Zande, B. V. D., Talen, A., Erp, T. V., & Schlangen, L. J. M. (2009). Comfortable lighting for seniors: the effect of illuminance and color temperature on the visual acuity in later life., *Proceedings Lux Europa*, Istanbul, abstract 306.
- Gibson, K. S., & Tyndall, E. P. T. (1923). Visibility of radiant energy. *Scientific Papers of the Bureau of Standards.*, 475, 11-21.
- Gibson, K.S. (1924) The relative visibility function, *CIE Sixième Session, Genève*, Juillet, 1924. *Recueil des Travaux et Compte Rendu de Séances*, Cambridge, the University Press, 1926: 232–38.
- Goodman, T., A. Forbes, H. Walkey, M. Eloholma, L. Halonen, J. Alferdinck, A. Freiding, P. Bodrogi, G. Várady, and A. Szalmas. (MOVE mesopic.) (2007). Mesopic visual efficiency IV: A model with relevance to nighttime driving and other applications. *Lighting Research and Technology* 39(4): 365-392.
- Grondzik, W.T., Wok, A.G., (2019). *Mechanical and electrical equipment for buildings*. Wiley
- Guirao Pinera, A. (1998). *Calidad óptica del ojo humano en función de la edad*. Universidad de Murcia.

- Hartstein, L. E., LeBourgeois, M. K., & Berthier, N. E. (2018). *Light correlated color temperature and task switching performance in preschool-age children: Preliminary insights*. Retrieved from https://scholar.colorado.edu/libr_oafund/92
- Helmholtz, H.L.F.von, (1856). *Handbuch der Physiologischen Optik*. Traducción al inglés en New York: Dover Publications Inc., 1962.
- Hertz, H.R. (1887). Ueber sehr schnelle electrische Schwingungen. *Annalen der Physik und Chemie*, 267(7), 421-448.
- Hyde, E.P., Forsythe, W.E. and Cady, F.E. (1918). The visibility of radiation. *The Astrophysical Journal*, 48, 65.
- IES (2011). *The lighting handbook* (10. ed. ed.). New York, NY: Illuminating Engineering Society of North America. (Ver Dilaura, 2011)
- IESNA-Illuminating Engineering Society of North America. (2000). *The iesna lighting handbook: Reference & application* (9th ed.). New York, NY: Illuminating Engineering Society of North America.
- Ives, H. E., Coblentz, W.W., (1908). Luminous efficiency of the firefly. *Bulletin of the Bureau of Standards*, 6 (3), 321.
- Ives, H. E. (1912). Studies in the photometry of lights of different colours -I. Spectral luminosity curves obtained by the equality of brightness photometer and the flicker photometer under similar conditions. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 24(139), 149-188. doi:10.1080/14786440708637317
- Ives, H. E. (1912). Studies in the photometry of lights of different colours.-III. distortions in spectral luminosity curves produced by variations in the character of the comparison standard and of the surroundings of the photometric field. *London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 24(143), 744.

- Ives, H. E. (1912). Studies in the photometry of lights of different colours.-V. the spectral luminosity curve of the average eye. *London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 24(144), 853.
- Ives, H. E. (1919). The photometric scale. *The Journal of the Franklin Institute*, 188, 217
- Joule, J. P. (1850). *On the mechanical equivalent of heat*. London: Taylor.
- Judd, D.B. (1951) Report of US Secretariat Committee on colorimetry and artificial daylight. *CIE Compte Rendu, 12th Session*, Stockholm, vol. I, part 7. 1–49. CIE Central Bureau, New York.
- Kepler, J. (1604). *Ad vitellionem paralipomena quibus astronomiae pars optica traditur*. Francofurti: apud Claudium Marnium & Haeredes Ioannis Aubrii.
- König, A.; Dieterici, C. (1892) Die Grundempfindungen in normalen und anomalen Farbsystemen und ihre Intensitätsvertheilung im Spectrum [Las sensaciones fundamentales en sistemas cromáticos normales y anormales y su distribución de intensidad en el espectro], *Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane*, 4, 241–347.
- Kraft, J. K. & Werner, J. S. (1994). Spectral efficiency across the life span: Flicker photometry and brightness matching. *Journal of the Optical Society of America A*, 11, 1213-1221.
- Ladenheim, B. & Gordon, J. (1986). Heterochromatic flicker photometry in neonates. *investigative Ophthalmology and Visual Science (Suppl.)*, 27, 76.
- Lambert, J. H. (1760). *Photometria*. Augustae Vindelicorum: Klett.
- Langley, S.P. (1888) Energy and Vision. *American Journal of Science*. 36. 1888.
- Lozano RD, Palmer DA. (1968) Large-field color matching and adaptation. *Journal of the Optical Society of America*. 58: 1653–56.
- Luna, D. & Tudela, P. (2006). *Percepción visual*. Trotta.

- Macfarlane, A. (1895) On the units of light and radiation. *Early Publications of the Lehigh Faculty*. Paper 9. Lehigh preserve.
- Mantiuk, R.F., Ramponi, G. (2015). Human vision model including age dependencies. *23rd European Signal Proceeding Conference*.
- Marks (1890). The efficiency of the arc lamp. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, VII, 175
- Maxwell, J. (1861). *On physical lines of force*. London: s.n
- Maxwell, J. (1865). *A dynamical theory of the electromagnetic field: By J. clerk maxwell...; received october 27, read december 8, 1864*. London: The Society.
- Mayer, J. R. (1842). Bemerkungen über die Kräfte der unbelebten Natur. *Annalen der Chemie und Pharmacie*, 42(2), 233-240.
- Melloni, M. (1850). *La thermochrôse ou la coloration calorifique*. France
- Merritt, E., Ryder, S. (1886). *The Mechanical Equivalent of light*. Cornell University.
- Morren, L. (1979). On the significance of the colour matching function $y_{10}(\lambda)$. *CIE 19th session*, 79.12, 96-98. Kyoto.
- Moscowitz-Cook, A. (1979). The development of photopic spectral sensitivity in infants. *Vision Research*, 19, 1133-1142
- Nakano, H. (1889). The efficiency of the arc lamp. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, VI (5), 308-321
- Newsham, G., Arsenault, C., Veitch, J., Tosco, A. M., & Duval, C. (2005). *Task lighting effects on office worker satisfaction and performance, and energy efficiency*. *Leukos*, 1(4), 7-26
- Newton, I. (1704). *Opticks: Or, A treatise of the reflexions, refractions, inflexions and colours of light* (1. ed. ed.). London: Smith and Walford.

- Nichols, E. L. (1889). The efficiency of methods of artificial illumination. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, VI (5), 157-202.
- Nichols, E. L., Franklin, W.S. (1889). Spectro-photometric Comparison of Sources of Artificial Illumination. *The American Journal of Sciences*, 38, 100.
- Nichols, E.L., Crehore (1894) Studies on the lime light. *Physical Review*, 2, 161.
- Nichols, E. L. (1900). Preliminary note on the efficiency of the acetylene flame. *Physical Review (Series I)*, 11(4), 215-229.
- Nusinowitz, S. & Mauer, D. (1992). The luminous efficiency of colored stimuli for the newborn. *Investigative Ophthalmology and Visual Science (Suppl.)*, 33, 714.
- Nutting, P.G. (1907). The Luminous Equivalent of Radiation. *Physical Review.*, 24 (2).
- Nutting, P.G. (1914). The visibility of radiation. *Transactions of the Illuminating Engineering Society*, 9, 633. IES. New York.
- Orreveteläinen, P., Viikari, M., Halonen, L. (2005). Make way for peripheral $V(\lambda)$. *Light & Engineering*. 13 (3), 23-34.
- Owsley, C. (2011). Aging and vision. *Vision Research*, 51(13), 1610-1622
- Palaz, A. (1892). *Traité de photométrie industrielle spécialement appliquée à l'éclairage électrique*. France: G. Carré.
- Peeples, D. R. & Teller, D, (1978). White-adapted photopic spectral sensitivity in human infants. *Vision Research*, 18, 49-53.
- Pickering, W.H. (1880) Photometric Researches. *Proceedings of the American Academy of arts and sciences*.
- Pokorny, J., Smith, V.C., y Lutze, M. (1987). Aging of the human lens. *Applied Optics*, 26. 1437-1440.

- Preece, W.H. (1883). On a new standard of illumination and the measurement of light. *Proceedings of the Royal Society of London*, 36(228-231), 270-275.
- Priest, I.G. (1920). *A New study of the leucoscope and its application to byrometry*. Journal of the Optical Society of America, 4, 471.
- RAI (2020). Diccionario español de ingeniería de la Real Academia de Ingeniería. <http://diccionario.raing.es/home>
- Rea, M.S. (1981) Visual performance of realistic methods of changing contrast. *Journal of the Illumination Engineering Society*. 10 (3), 164-177
- Rea, M.S. (1999). A unified system of photometry for lighting application, *Proceedings of the CIE Symposium '99, 75 years of CIE photometry*, CIE 018, 10.1-10.8.
- Rea, M. S., J. D. Bullough, J. P. Freyssinier-Nova and A. Bierman. (2004). A proposed unified system of photometry. *Lighting Research and Technology* 36(2): 85-111.
- Rea, M.S., Oullette, M.J. (1988). Visual performance using reaction times. *Lighting Research and Technology*. 20 (4), 139-153.
- Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el *Código Técnico de la Edificación*. Boletín Oficial del Estado, España. <https://www.codigotecnico.org>
- Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el *Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (edición actualizada a 17 de enero de 2020)*. Agencia Estatal BOE. https://www.boe.es/biblioteca_juridica/index.php?tipo=C
- Real Decreto 1890/2008, de 14 de noviembre, por el que se aprueba el *Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus Instrucciones técnicas complementarias EA-01 a EA-07*. Boletín Oficial del Estado, España. http://www.f2i2.net/documentos/lsi/Dis_4584.pdf
- Real Decreto, proyecto (2019) por el que se aprueba el *Reglamento de eficiencia energética de instalaciones de alumbrado exterior y sus instrucciones técnicas complementarias*. Ministerio de Industrias, Movilidad y Agencia Urbana:

https://industria.gob.es/es-es/participacion_publica/Paginas/proyecto-RD-reglamento-eficiencia-energetica.aspx

Reeves, P. (1918). The visibility of radiation. *Transactions of the Illuminating Engineering Society*, 13, 101. IES. New York.

Rogers (1892). On the efficiency of the magnesium as a source of light. *American Journal of Sciences*, 43, 301.

Sagawa, K., Takahashi, Y. (2001) Spectral luminous efficiency as a function of age. *Journal of the Optical Society of America*. 18 (11), 2659-2667.

Said, F.S., Weale, R.A. (1959). The variation with age of the spectral transmissivity of the living human crystalline lens. *Gerontologia*. 3 (4), 213-231.

Schanda, J., Morren, L., Rea, M., Rositani-Ronchi, L., y Walraven, P., (2002). Does Lighting Need more Photopic Luminous Efficiency Functions? *Lighting Research Technology*, 34 (1), 69-78

Schlangen, L.J.M. et al. (2015) workplace illumination effects on acuity, cognitive performance and well-being in older and young people. *Proceedings of 28th CIE Session*, 2015.

Sharper, L.T., Stockman, A., Jagla, W. et al. (2005). A luminous efficiency function $V^*(\lambda)$, for daylight adaptation. *Journal of Vision*. (5) 11, 948-968.

Szekely, B. (1966). *Los test, manual de técnicas de exploración psicológica*. Ed. Kapelusz, Buenos Aires.

Smith, S.W., Rea M.S. (1978). Proofreading under different levels of illumination. *Journal of the illuminating Engineering Society*. 8 (1). 47-52.

Smith, S.W., Rea M.S. (1980). Relationships between office task performance and ratings of feelings and task evaluation under different light sources and levels. *Proceedings: 19th session, Commission Internationale de l'Eclairage*.

- Smith, S.W., Rea M.S. (1982). Performance of Reading test under different levels of illumination. *Journal of the Illuminating Engineering Society*. 12 (1), 29-33.
- So, M. (1920). On the Visibility of radiation. Proceedings of the Physical and Mathematical Society of Japan (3), 2, 177–184.
- Speranskaya, N.I. (1959). Determination of spectrum color coordinates for twenty-seven normal observers. *Optics and spectroscopy*, 7, 424-428
- Staub, G. (1890). Calorimetrische Beobachtungen. Theil 2: Beobachtungen über Wärme und Lichtentwickelungen bei Funkenentladungen [Observaciones calorimétricas. Parte 2: Observaciones sobre el desarrollo de calor y luz durante las descargas de chispas]. *Annalen der Physik und Chemie*, 14, 538. Leipzig.
- Stiles, W.S. and Burch, J.M. (1959) N.P.L. colour-matching investigations: final report. *Optica Acta*, 6, 1-26.
- Teller, D. & Lindsey, D. T. (1989). Motion nulls for white versus isochromatic gratings in infants and adults. *Journal of the Optical Society of America, A*, 12, 1945-1954.
- Thomsen, J. (1865). Das mechanische aequivalent des lichts [el equivalente mecánico de la luz]. *Annalen Der Physik Und Chemie (Poggendorff's Annalen)*, CXXV (5), 348-353
- Titchener, E. B. (1901). *Experimental psychology*. New York: The Macmillan Co.
- Toulouse, E., Piéron, H. (2013), *TP-R.Toulouse-Piéron-Revisado. Manual*. Tea.
- Trezona, P.W. (1983). Luminance level conversions to assist lighting engineers to use fundamental visual data. *Lighting Research & Tecnology*, 15 (2), 83-88
- Tumlirz, O. (1889). Das mechanische Aequivalent des Lichtes. *Annalen der Physik (Wiedemanns Annalen)*, 38, 640.
- UNE-EN-12193 (2020). *Iluminación. Iluminación de instalaciones deportivas*. AENOR.

- UNE-EN-12464 (2012). *Iluminación. Iluminación de los lugares de trabajo. Parte 1: Lugares de trabajo en interiores*. AENOR.
- UNE-EN-12464 (2008). *Iluminación. Iluminación de los lugares de trabajo. Parte 2: Lugares de trabajo en exteriores*. AENOR.
- UNE-EN-13201 (2015, 2016). *Iluminación de carreteras. Partes 2 a 5*. AENOR.
- UNE-EN-13201 (2004, 2007). *Iluminación de carreteras. Partes 2 a 5*. AENOR.
- UNE-EN-15193 (2019). *Eficiencia energética de los edificios. Requisitos energéticos para iluminación*. Parte 1: Especificaciones, módulo M9. AENOR
- Veitch, J.A., newsham, G.R., Mancini, S., Arsenault, C.D. (2010). Lighting and office renovation Effects on Employees and Organizational Well-Being, *National Research Council of Canada*.
- Veitch, J.A., (2011). Workplace Design contributions to Mental Health and Well-being. *Healthcare Papers*, 11(SP), 38-46
- Veitch, J. A., Fotios, S. A., & Houser, K. W. (2019). Judging the scientific quality of applied lighting research. *Leukos*, 15(2-3), 97-114
- Vierordt, C. (1869). Beschreibung einer photometrischen Methode zur Messung und Vergleichung der Stärke des farbigen Lichtes. [Descripción de un método fotométrico para medir y verificar la intensidad de la luz coloreada]. *Annalen der Physik und Chemie*. 137 (5). 200. Leipzig.
- Viikari, M., Eloholma, M., Halonen, L. (2005). 80 years of $V(\lambda)$ use: a review. *Light & Engineering*, 13 (4): 24-36
- Violle, J. (1884). On the absolute standard of light. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 17(109), 563-564. [Translated from the *Comptes Rendus* of 28 April 1884].
- Vos, J.J. (1978) Colorimetric and Photometric properties of a 2-deg fundamental observer. *Color Research and application*, 3, 125-128.

- Vos, J.J., Boogaard, J. (1963). Contribution of the cornea to the entoptic scatter. *Journal of the Optical Society of America*, 53 (7): 869-873.
- Wald, G. (1945). Human Vision and the Spectrum, *Science*, 101, 653-658.
- Weale, R.A. (1985). Human lenticular fluorescence and transmissivity, and their effects on vision. *Experimental Eye Research*, 41(4), 457-473.
- Weale, R.A. (1988). Age and the transmittance of the human crystalline lens. *Journal of Physiology*, 395, 577-587
- Weale, R.A. (1992). *The senescence of human vision*. New York: Oxford University Press.
- Werner, J.S., Scheffrin, B.E. and Bradley, A. (2010) Optics and vision of the aging eye. *Handbook of optics. Vision and vision optics*. 3
- Wolf, E., Gardiner, J.S. (1965). Studies on the scatter of light in the dioptric media of the eye as a basis of visual glare. *Arch. Ophthalmology*. 74 (3), 338-345
- Wright WD. (1972) Colour mixture. *Handbook of Sensory Physiology*, Vol. VII/4, 434–454.
- Wünder, W. (1874). *Principles of physiological psychology. translated from the fifth german edition, 1902, by E. B. titchener*.
- Young, T. (1802) *The Bakerian lecture. On the theory of light and colours*. Proc. R. Soc. London.
- Young, T. (1807) *A Course on Lectures on Natural Philosophy and the Mechanical Arts*; Vol II. London: Willian Savage, Bedford Bury.
- Yuodelis, C., Hendrickson, A. (1986), A qualitative and quantitative análisis of the human fovea during development. *Vision Research*, 26, 847-855
- Zöllner, J. K. F. (1865). *Photometrische untersuchungen*. Leipzig: Engelmann.
- Zuclich, J.A., Glickman, R.D., Menendez, A.R. (1992), Insitu measurements of lens fluorescence, *Investigative Ophtalmolgy & Visual Science*, 32 (2), 410-415

ANEXO I

ÍNDICE DE TABLAS, GRÁFICAS, FIGURAS, ECUACIONES Y CITAS

ANEXO I. ÍNDICE DE TABLAS, GRÁFICAS, FIGURAS, ECUACIONES Y CITAS

Índice de tablas:

Tabla 1. Distribución poblacional de la toma de datos llevada a cabo por Gibson y Tyndall en 1923	14
Tabla 2. Caracterización de los observadores que participaron en la investigación de Gibson y Tyndall	15
Tabla 3. Valores de visibilidad relativa obtenidos por Gibson y Tyndall para la región central del espectro visible	16
Tabla 4. Confrontación de los datos presentados por T. Young con los actuales.....	32
Tabla 5. Relación entre radiación y luz propuesta por J. Thomsen.....	40
Tabla 6. Relación no exhaustiva de las eficiencias propuestas en diversas investigaciones	53
Tabla 7. Edad de los participantes en las diferentes tomas de datos consideradas por Gibson y Tyndall	74

Tabla 8. Condiciones de observación de las tomas de datos consideradas por Gibson y Tyndall	74
Tabla 9. Valores de sensibilidad relativa para las funciones de sensibilidad de 1924 y 1931	77
Tabla 10. Factores del rendimiento visual considerados en la normativa ANSI-RP	96
Tabla 11. Dimensión de la muestra determinada para cada población estudiada	127
Tabla 12. Estructura de la muestra poblacional articulada en secciones	128
Tabla 13. Distribución de la sección 1 de la muestra en grupos de trabajo	128
Tabla 14. Distribución de la sección 2 de la muestra en grupos de trabajo	128
Tabla 15. Especificaciones técnicas del luminancímetro empleado.....	132
Tabla 16. Especificaciones técnicas del colorímetro empleado	133
Tabla 17. Especificaciones técnicas del luxómetro empleado	133
Tabla 18. Esquema de distribución de sesiones de un grupo del colectivo 1.	137
Tabla 19. Resumen de las condiciones en que se desarrollaron las diferentes tomas de datos consideradas por Gibson y Tyndall.....	153
Tabla 20. Superficie de la abertura pupilar en función de la edad del observador y la luminancia de la superficie observada. (Calculada a partir de los datos del IES).	154
Tabla 21. Valores medios de transmitancia del cristalino en función de la edad.	156
Tabla 22. Coeficientes de variación del estímulo retinal referenciados a un observador de 25 años. Calculados tomando como base los datos publicados por la IES	157
Tabla 23. Resumen de las características básicas de las cuatro fuentes luminosas analizadas.....	171

Tabla 24. Incremento de flujo luminoso e imagen retinal (para jóvenes adultos) de las fuentes. (referenciado a la fuente de menor flujo luminoso).....	174
Tabla 25. Pérdida de intensidad de la imagen retinal obtenida para cada colectivo por aplicación de los coeficientes de transmisión de los medios visuales.....	176
Tabla 26. Pérdida de intensidad de la imagen retinal referenciada a la imagen de mayor intensidad en función de la edad y la temperatura de color de la fuente	176
Tabla 27. Luminancias calculadas para las iluminancias de la toma de datos	180
Tabla 28. Superficie pupilar en mm ² (y factores de reducción de la superficie).....	180
Tabla 29. Pérdida de intensidad de la imagen retinal referenciada a la imagen de mayor intensidad en función de la edad y la temperatura de color	181
Tabla 30. Coeficientes que es necesario aplicar al nivel de iluminación y que permiten equiparar la imagen retinal generada en cada uno de los colectivos.....	182
Tabla 31. Porcentaje de transmisión difusa frente a global (20-29 años)	187
Tabla 32. Porcentaje de transmisión difusa frente a global (50-59 años)	187
Tabla 33. Coeficientes para el cálculo de la fracción de transmisión directa	189
Tabla 34. Porcentajes de corrección debido a la transmitancia difusa.....	189
Tabla 35. Distribución de tiempos de las diferentes sesiones de trabajo.....	198
Tabla 36. Valores de las condiciones experimentales empleadas en cada sección ..	201
Tabla 37. Distribución de sesiones para los grupos de la sección 1	202
Tabla 38. Distribución de sesiones para los grupos de la sección 2	202
Tabla 39. Parámetros estadísticos relativos al incremento experimentado por el IGAP al modificar los niveles de iluminación manteniendo fija la temperatura de color para el colectivo de entre 20 y 29 años de edad	205

Tabla 40. Parámetros estadísticos relativos al incremento experimentado por el IGAP al modificar los niveles de iluminación manteniendo fija la temperatura de color para el colectivo de entre 30 y 39 años de edad	208
Tabla 41. Parámetros estadísticos relativos al incremento experimentado por el IGAP al modificar los niveles de iluminación manteniendo fija la temperatura de color para el colectivo de entre 40 y 49 años de edad	211
Tabla 42. Parámetros estadísticos relativos al incremento experimentado por el IGAP al modificar los niveles de iluminación manteniendo fija la temperatura de color para el colectivo de entre 50 y 59 años de edad	214
Tabla 43. Parámetros estadísticos relativos al incremento experimentado por el IGAP al modificar los niveles de iluminación manteniendo fija la temperatura de color para el colectivo de entre 60 y 69 años de edad	216
Tabla 44. Parámetros estadísticos relativos al incremento experimentado por el IGAP al modificar la temperatura de color correlacionada manteniendo fija la iluminancia	222
Tabla 45. Niveles de iluminación (lx) y temperaturas de color correlacionadas (K) recomendados para el desarrollo de las tareas básicas del uso administrativo.....	233
Tabla 46. Propuesta de modificación de la tabla 5.26 de la norma española	234

Índice de gráficas:

Gráfica 1. Pérdida de intensidad de la imagen retinal obtenida para cada grupo de edad por aplicación del coeficiente de transmisión de los medios visuales	177
Gráfica 2. Pérdida de intensidad de la imagen retinal referenciada a la imagen de mayor intensidad en función de la edad y la temperatura de color	177
Gráfica 3. Pérdida de intensidad de la imagen retinal referenciada a la imagen de mayor intensidad en función de la edad y la temperatura de color	181
Gráfica 4. Coeficientes que es necesario aplicar al nivel de iluminación y que permiten equiparar la imagen retinal generada en cada uno de los colectivos.....	182
Gráfica 5. Incrementos del Índice General de Atención y Percepción (eje vertical) para el colectivo de 20 a 29 años, obtenidos al variar el nivel de iluminación (eje horizontal) para las diferentes calidades de luz empleadas en la toma de datos	206
Gráfica 6. Incrementos del Índice General de Atención y Percepción (eje vertical) para el colectivo de 30 a 39 años, obtenidos al variar el nivel de iluminación (eje horizontal) para las diferentes calidades de luz empleadas en la toma de datos	209
Gráfica 7. Incrementos del Índice General de Atención y Percepción (eje vertical) para el colectivo de 40 a 49 años, obtenidos al variar el nivel de iluminación (eje horizontal) para las diferentes calidades de luz empleadas en la toma de datos	212
Gráfica 8. Incrementos del Índice General de Atención y Percepción (eje vertical) para el colectivo de 50 a 59 años, obtenidos al variar el nivel de iluminación (eje horizontal) para las diferentes calidades de luz empleadas en la toma de datos	215
Gráfica 9. Incrementos del Índice General de Atención y Percepción (eje vertical) para el colectivo de 60 a 69 años, obtenidos al variar el nivel de iluminación (eje horizontal) para las diferentes calidades de luz empleadas en la toma de datos	217

Gráfica 10. Incrementos del Índice General de Atención y Percepción (eje vertical) obtenidos al variar la temperatura de color correlacionada (eje horizontal) con 3000 lx de iluminancia.....	219
Gráfica 11. Incrementos del Índice General de Atención y Percepción (eje vertical) obtenidos al variar la temperatura de color correlacionada (eje horizontal) con 2000 lx de iluminancia.....	219
Gráfica 12. Incrementos del Índice General de Atención y Percepción (eje vertical) obtenidos al variar la temperatura de color correlacionada (eje horizontal) con 2500 lx de iluminancia.....	219
Gráfica 13. Incrementos del Índice General de Atención y Percepción (eje vertical) obtenidos al variar la temperatura de color correlacionada (eje horizontal) con 1000 lx de iluminancia.....	220
Gráfica 14. Incrementos del Índice General de Atención y Percepción (eje vertical) obtenidos al variar la temperatura de color correlacionada (eje horizontal) con 750 lx de iluminancia.....	220
Gráfica 15. Incrementos del Índice General de Atención y Percepción (eje vertical) obtenidos al variar la temperatura de color correlacionada (eje horizontal) con 500 lx de iluminancia.....	220
Gráfica 16. Incrementos del Índice General de Atención y Percepción (eje vertical) obtenidos al variar la temperatura de color correlacionada (eje horizontal) con 300 lx de iluminancia.....	221
Gráfica 17. Incrementos del Índice General de Atención y Percepción (eje vertical) obtenidos al variar la temperatura de color correlacionada (eje horizontal) con 200 lx de iluminancia.....	221
Gráfica 18. Incrementos del Índice General de Atención y Percepción (eje vertical) obtenidos al variar la temperatura de color correlacionada (eje horizontal) con 150 lx de iluminancia.....	221

Índice de figuras:

Figura 1. Tabla original de valores de sensibilidad relativa (CIE, 1924).....	13
Figura 2. Datos de esperanza de vida en Estados Unidos en 1922 y 2016.....	17
Figura 3. Extracto de las exigencias genéricas de niveles de iluminación	21
Figura 4. Relación entre onda y color propuesta por Thomas Young	31
Figura 5. Propuestas de brillo relativo de A. König y C. Dieterici para observadores tricromáticos normales con diferentes niveles de iluminación	57
Figura 6. Valores de luminosidad espectral propuestos por H.E. Ives en 1912	69
Figura 7. Valores de visibilidad de la radiación propuestos por Nutting en 1914	70
Figura 8. Extracto de la tabla de visibilidad para observadores normales extraído de la publicación de Coblentz y Emerson	72
Figura 9. Funciones de eficiencia luminosa relativa espectral en función de la edad estimadas por Sagawa & Takahashi	87
Figura 10. Diámetro de apertura pupilar en función de la edad	89
Figura 11. Transmitancia de los medios oculares en función de la edad.....	90
Figura 12. Transmitancia global y directa de los medios oculares	91
Figura 13. Esquema de los tejidos oculares. El epitelio pigmentado retinal aparece identificado como RPE	92

Figura 14. Curva de emisión de dos fuentes led con temperatura de color 5000 K (CRI>80) procedentes de Samsung (LM561 B plus) y Nichia Corporation (STS-DA7-16045).....	112
Figura 15. Curvas de emisión de un led con fósforo YAG:Ce ³⁺ y un led bi-fósforo	114
Figura 16. Curvas de emisión de cuatro fuentes de diferente temperatura de color..	114
Figura 17. Figuras geométricas del test de percepción visual de Bender	118
Figura 18. Muestra de resultados de una prueba del test de Beery	118
Figura 19. Pruebas de estandarizadas de percepción/atención valoradas previamente al desarrollo de la toma de datos	119
Figura 20. Hoja de trabajo del test Toulouse-Pieron utilizada en la toma de datos ...	121
Figura 21. Hoja de trabajo del test de caras.....	122
Figura 22. Hoja de trabajo del Test estandarizado D-2	122
Figura 23. Plantilla diseñada para valorar la capacidad perceptiva	124
Figura 24. Datos estadísticos de la población objeto del estudio	125
Figura 25. Imagen tipo del generador aleatorio de números empleado durante el proceso de selección de los observadores.	126
Figura 26. Descripción gráfica de la sala de trabajo.....	130
Figura 27. Tratamiento de los puestos de trabajo y los paramentos para unificar las condiciones de luminancia en las que se desarrolla la toma de datos	130
Figura 28. Características geométricas de los módulos empleados en la toma de datos extraída de la documentación comercial.	131
Figura 29. Dispositivos de medición empleados durante la toma de datos.....	132
Figura 30. Zona de medición de los niveles de iluminación para el plano de trabajo	135

Figura 31. Luminancias (cd/m^2) medidas antes (izquierda) y después (derecha) de modificar las características superficiales del paramento vertical	135
Figura 32. Valores de luminancia (cd/m^2) obtenidos durante una de las sesiones ...	136
Figura 33. Formato del campo visual empleado por Gibson y Tyndall.	143
Figura 34. Dispositivo experimental diseñado por Gibson y Tyndal para su toma datos por identificación directa de brillo, con indicación de las características del campo visual observado.....	144
Figura 35. En la fotometría de parpadeo (Flicker photometry) dos campos visuales de diferente tonalidad se alternan para valorar la equivalencia de brillo.....	145
Figura 36. Diámetro de apertura pupilar en función de la edad y la luminancia de la superficie observada. (IES, 2011)	154
Figura 37. Evolución de la apertura pupilar y la transmitancia el cristalino en función de la edad. (IES, 2011).....	156
Figura 38. Imagen obtenida en el análisis espectral de las fuentes empleadas	166
Figura 39. Curvas de emisión relativa de las fuentes luminosas consideradas	166
Figura 40. Ejemplo de los valores de emisión de las cuatro fuentes.....	168
Figura 41. Ejemplo de valores de ponderación empleados para determinar el flujo luminoso emitido por las fuentes normalizadas.....	170
Figura 42. esquema simplificado del ojo humano	173
Figura 43. Transmitancia de los medios oculares en función de la edad.....	175
Figura 44. Transmitancia del humor acuoso en función de la longitud de onda	184
Figura 45. Transmitancia global y difusa (línea punteada) del humor vítreo en función de la longitud de onda	185

Figura 46. Transmitancia global y difusa de la córnea en función de la longitud de onda. La línea inferior está referida al colectivo de mayor edad	186
Figura 47. Transmitancia global y difusa del cristalino. La línea intermedia está referida al colectivo de mayor edad	187
Figura 48. Baremo general tipificado del test Toulouse Pieron (para adultos).....	197
Figura 49. Datos de corrección empleados en la valoración de la prueba.....	200

Índice de ecuaciones:

Ecuación 1. Eficiencia total (Nichols, 1889).....	62
Ecuación 2. Eficiencia luminosa reducida (Guillaume, 1905).....	62
Ecuación 3. Expresión matemática de la luminancia	76
Ecuación 4. Cálculo de la luminancia de superficies lambertianas	79
Ecuación 5. Relación entre la cantidad de luz que accede al ojo y la luminancia.....	83
Ecuación 6. Ecuación empleada para la determinación del tamaño de la muestra ...	126
Ecuación 7. Incremento relativo de la densidad de flujo luminoso en la retina en función de la edad (referenciado al colectivo de 20 a 30 años)	157
Ecuación 8. Ecuación empleada para la reducción a 1 W del flujo radiante teórico ..	167
Ecuación 9. Determinación del flujo luminoso emitido por las fuentes	169
Ecuación 10. Fórmula empleada para el cálculo de la luminancia observada.....	179
Ecuación 11. Determinación del contraste para la tarea de lectura	191
Ecuación 12. Determinación del contraste reducido por efecto del velo luminoso.....	192
Ecuación 13. Índice global de atención y percepción.....	196
Ecuación 14. Ecuación empleada para la determinación del error en cada serie	204

Índice de citas:

Sir H. Davy, <i>On heat, light, and the combinations of light</i> (1799)	30
Sir T. Young, <i>On the Theory of light and colours</i> (1801)	31
Sir Thomas Young, <i>A Course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts</i> , (1807)	33
Sir Thomas Young, <i>A Course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts</i> , (1807)	34
N.L. Sadi Carnot, <i>Reflections on the motive power of heat</i> (1897).....	36
J.W. Draper, <i>A text book on chemistry</i> (1846).....	36
J.C. Maxwell, <i>Op. Cit, part III</i>	40
J.C. Maxwell, <i>A dynamical theory of the electromagnetic field</i>	41
W.H. Preece, <i>On a new standard of illumination and the measurement of light</i>	45
A. MacFarlane, <i>On the units of light and radiation</i> (1895)	47
A. Palaz, <i>Traité de photométrie industrielle</i> (1892).....	50
S.P. Langley, <i>Energy and vision</i> (1888)	55
E.L. Nichols, <i>The efficiency of methods of artificial illumination</i> (1889)	58
T. Vaultier,	60
P.G. Nutting, <i>The luminous efficiency of radiation</i> (1907)	64
IESNA Lighting Handbook (2001).....	85
W.H. Preece, <i>On a new standard of illumination and the measurement of light</i>	97
IESNA Lighting Handbook (2001).....	103