

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL



Tesis Doctoral

MEDIDA Y EVALUACIÓN DE LA  
CONTAMINACIÓN LUMÍNICA EN  
ENTORNOS URBANOS

**Autor: José Luis Navas Borrero**

**Directores: Dr. José Ramón de Andrés Díaz  
Dr. Juan Ramón Heredia Larrubia**

Publicaciones y  
Divulgación Científica



**Programa de doctorado: Ingeniería y gestión de proyectos**

**Málaga, 2015**



**Programa de Doctorado:  
INGENIERÍA Y GESTIÓN DE PROYECTOS.**

**Escuela Técnica Superior de  
Ingenieros Industriales**

**Universidad de Málaga**

**“MEDIDA Y EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN LUMÍNICA  
EN  
ENTORNOS URBANOS”**

**Tesis Doctoral**

Presentada por:

**José Luis Navas Borrero**

Dirigida por:

**Dr. José Ramón de Andrés Díaz**

**Dr. Juan Ramón Heredia Larrubia**

Málaga, Octubre de 2015



Publicaciones y  
Divulgación Científica

AUTOR: José Luis Navas Borrero

 <http://orcid.org/0000-0001-5855-3466>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA): [riuma.uma.es](http://riuma.uma.es)

---

D. JOSÉ RAMÓN DE ANDRÉS DIAZ, Dr. Ingeniero Industrial, Profesor Titular de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad de Málaga, en el Área de Proyectos de Ingeniería

y

D. JUAN RAMÓN HEREDIA LARRUBIA, Dr. Ingeniero de Telecomunicación, Profesor Titular de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad de Málaga, en el Área de Tecnología Electrónica,

actuando en calidad de Directores de la tesis, HACEN CONSTAR:

Que la tesis presentada por D. José Luis Navas Borrero, con el título “MEDIDA Y EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN LUMÍNICA EN ENTORNOS URBANOS”, se ha desarrollado bajo nuestra dirección durante los años 2011, 2012, 2013, 2014 y 2015 y reúne los requisitos necesarios para optar al grado de Doctor.

Y para que así conste a los efectos oportunos, expedimos y firmamos el presente documento en Málaga, a veinte de octubre de dos mil quince,



*"Solo el que lo ha vivido sabe lo que son años enteros,  
presintiendo y buscando en la oscuridad con un tenso anhelo,  
la alternativa de firme esperanza y de desfallecimiento,  
hasta que por fin un día irrumpe la claridad".*

*( Albert Einstein )*



## Agradecimientos:

Llegados a este punto no resulta fácil enumerar las personas a las que agradecer su ayuda, directa o indirecta, y gracias a las cuales he podido realizar este trabajo. Dicen que somos el resultado de la suma ponderada de todas las personas que hemos conocido a lo largo de nuestra vida y, en consecuencia, todas ellas han contribuido a esta causa y a todas ellas debo agradecer su contribución.

Nombrarlas a todas sería imposible y sin duda caería en la injusticia de omitir a más de una. Tampoco sería justo no agradecer a quienes han sido mis colaboradores directos como lo han sido mis directores de tesis, José Ramón de Andrés Díaz y Juan Ramón Heredia Larrubia, no sólo por los conocimientos y consejos que de ellos he recibido sino también por haber sabido tolerar y soportar, a lo largo de años, las circunstancias y peculiaridades que, a mi edad, no son las de un joven recién titulado.

Gracias a todos los que me han ido trazando el camino que me ha llevado hasta este punto, que no es más que el punto de partida hacia el resto del trayecto.



## Estructura y planteamiento de la memoria:

Con el título de “Medida y evaluación de la contaminación lumínica en entornos urbanos” esta tesis no se plantea con un único objetivo en la búsqueda de un resultado específico o de un producto final. Como se plantea en la introducción, en el momento en que se inicia este trabajo la contaminación lumínica no cuenta aún con una consideración y estudios sólidos ni con una regulación o normativa afianzada. Tanto desde el punto de vista tecnológico, como del normativo e incluso en su propia definición, la contaminación lumínica no contaba entonces con un planteamiento consolidado.

En ese momento, la tecnología, y en particular la instrumentación electrónica, estaban sufriendo avances muy significativos que han supuesto grandes cambios en la instrumentación y en los equipos electrónicos. La tecnología y el procesamiento digital han revolucionado en la última década muchos campos de la instrumentación y equipamientos electrónicos. Estos cambios se han visto reflejados en contextos como las comunicaciones, la telefonía, la fotografía, la televisión, la imagen, el sonido y, en general, todos los campos donde el tratamiento de señal ha respondido a un crecimiento exponencial de la tecnología digital tanto en prestaciones como en bajada de costes. La instrumentación electrónica no ha escapado a estos cambios y hoy en día equipos e instrumentos comerciales y de costes no prohibitivos alcanzan prestaciones muy superiores a las que tenían equipos profesionales y costosos hace pocos años.

Por otra parte, el contexto de mayor influencia en los estudios de la contaminación lumínica era el astronómico y de él surgen los primeros estudios y normativas relacionados. La mayoría de los trabajos de investigación y las propuestas de equipos de medición así como la propia normativa tenían sus orígenes en el contexto astronómico.

Estas razones fueron una de las principales motivaciones para iniciar un estudio de la contaminación lumínica y su medida y evaluación bajo el enfoque del entorno urbano tanto bajo la perspectiva de los efectos de ésta sobre el mismo como bajo la perspectiva de que este entorno es en sí mismo la principal fuente contaminante.

Esta tesis contempla un conjunto de actividades y trabajos que han ido desde el estudio previo del estado del arte en los aspectos de definición, instrumentación, organizaciones y normativas, pasando por el análisis de la instrumentación existente hasta llegar al estudio de los aspectos relacionados con el contexto urbano y la propuesta de alternativas para la medición y evaluación de la contaminación lumínica así como alguna aplicación específica y particular como el caso de los anuncios y señales luminosas.

Consecuentemente esta memoria no se ha planteado en su totalidad en la línea de un trabajo concreto con la estructura clásica de “Introducción-hipótesis-metodología-resultados y conclusiones” que correspondería a un tipo de trabajo científico con una hipótesis concreta y

---

su demostración. Para exponer las diferentes actividades realizadas se ha estructurado el documento en capítulos con los siguientes contenidos:

- **Capítulo 1:** Capítulo de introducción donde se expone la motivación que llevó a la realización y planteamiento de la tesis, los objetivos perseguidos, consideraciones a tener en cuenta y los conceptos introductorios relacionados con la contaminación lumínica.
- **Capítulo 2:** En este capítulo se realiza una revisión histórica de la contaminación lumínica a través de la normativa que ha ido apareciendo relacionada con la misma. No es objeto de este estudio la revisión en sí de dicha normativa sino que se plantea la reciente aparición de normativas relacionadas como justificación del planteamiento bajo el cual se encontraba la contaminación lumínica en los momentos del comienzo de esta tesis y de cómo ha ido evolucionando en estos años.
- **Capítulo 3:** Aquí se realiza un estudio del estado del arte y de los principios utilizados en los instrumentos y técnicas para la medición de la contaminación lumínica. En este estudio se constatan técnicas relacionadas con los diferentes contextos afectados por la contaminación lumínica (astronómico, urbano, ambiental, ...) y se puede observar un mayor desarrollo en el ámbito astronómico en tanto que en el ámbito urbano, y más aún si nos ceñimos a la normativa, la instrumentación se reduce prácticamente a luxómetros y luminancímetros (desde el punto de vista normativo). Algunos estudios y desarrollos plantean ya alternativas como el uso de cámaras fotográficas digitales (entre ellos esta tesis) u otras técnicas como la fotografía aérea o vehículos dotados de equipamiento para la medición de parámetros.
- **Capítulo 4:** En este capítulo se relacionan diversos proyectos, organizaciones y entidades que destacan o han destacado con una participación activa en la lucha contra la contaminación lumínica, su estudio y sus efectos. Nuevamente se constata la prevalencia de entornos relacionados con la astronomía y se pone en evidencia la necesidad de reforzar la participación en los otros contextos afectados, como realmente se viene produciendo recientemente.
- **Capítulo 5:** En este capítulo se desarrollan y exponen las principales actividades de investigación y propuestas realizadas en la tesis. Dentro de las distintas actividades y trabajos realizados, con el objeto de aportar resultados prácticos a la medición de la contaminación lumínica en entornos urbanos, cabe destacar primordialmente la propuesta de la utilización de cámaras comerciales para la medición y/o evaluación de valores de luminancias y su aplicación al contexto urbano. En este sentido se ha realizado un trabajo de investigación aplicando una metodología, la propuesta de un algoritmo así como la realización de mediciones y obtención de resultados. En el mismo trabajo se ha desarrollado una herramienta informática para la obtención y validación de resultados. Además de este trabajo, que se podría considerar el principal

de esta tesis, se han realizados otras actividades como un estudio de la utilización de la propuesta anterior en la medición y evaluación de señales y anuncios luminosos (parte de instalaciones urbanas contempladas en la normativa) y del que se consiguió una publicación en la revista Dyna, referenciada en el JCR. Finalmente, disponiendo de un instrumento clásico en el entorno astronómico (SQM, Sky Quality Meter) con el que se realizaron comparaciones en el primer trabajo, se realizaron pruebas y mediciones en la línea de otros trabajos similares.

De este modo el capítulo 5 incluye los respectivos apartados:

- Propuesta de utilización de cámaras digitales comerciales.
  - Mediciones con el SQM.
  - Medida y evaluación de señales y anuncios luminosos.
- 
- **Capítulo 6:** En este capítulo se exponen las conclusiones y líneas de trabajo futuras obtenidas de los estudios anteriores.
  - **Anexos:** Donde se incluyen mención al artículo publicado y tablas resúmenes con ejemplos de mediciones y resultados.



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS.....</b>	<b>13</b>
Estructura y planteamiento de la memoria: .....	9
Índice de figuras .....	17
Índice de tablas .....	20
<b><u>CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN .....</u></b>	<b><u>21</u></b>
1.1.- Motivación.....	21
1.2.- Presentación.....	22
1.3.- Introducción.....	28
1.4.- Objetivos. ....	28
1.5.- La contaminación lumínica. ....	30
1.6.- Consideraciones.....	36
<b><u>CAPÍTULO 2 - REVISIÓN HISTÓRICA A TRAVÉS DE LA NORMATIVA. ANTECEDENTES.- .....</u></b>	<b><u>43</u></b>
2.1.- Introducción.....	43
2.2.- Normativas sobre contaminación lumínica en España.....	44
<b><u>CAPÍTULO 3.- ESTADO DEL ARTE DE LA INSTRUMENTACIÓN PARA LA MEDICIÓN DE LA CONTAMINACIÓN LUMÍNICA.- .....</u></b>	<b><u>51</u></b>
3.1.- Introducción.....	51
3.2.- El contexto astronómico, herramientas de evaluación. ....	52
3.2.1.- Los mapas de contaminación lumínica.....	53
3.2.2.- Los instrumentos de medida de la luminosidad del cielo. ....	59
3.2.2.1.- Sky Quality Meter. ....	60
3.2.2.2.- Cámaras fotográfica CCD o CMOS. ....	62
3.2.2.3.- Espectrofotómetro. ....	65
3.2.2.4.- Excalibur.....	66
3.2.2.5.- Fotografía con objetivo ojo de pez. ....	67
3.2.2.6.- Instrumentos de medición de parámetros lumínicos. ....	69
3.2.2.7.- Medida por contraste. ....	69
3.2.3.- Consideraciones en la medición de la contaminación lumínica en astronomía.....	70
3.3.- El contexto urbano, herramientas de evaluación.....	71
3.3.1.- Introducción.....	71
3.3.2.- El contexto urbano.....	72
3.3.3.- Herramientas de medición, contexto urbano. ....	74
3.3.3.1.- Fotografía aérea. ....	74

3.3.3.2.- El sistema LPDM (Light Pollution Mobile Detector).....	75
3.3.3.3.- Cámaras fotográficas calibradas .....	76
3.3.3.4.- Luxómetros y luminancímetros.....	78
3.3.3.4.1.- Luxómetro MAVOLUX 5032C/B.....	79
3.3.3.4.2.- Adaptador para densidad luminosa.....	79
3.3.3.4.3.- Medidor de luminancia Konica Minolta LS-100 / LS-110.....	80
3.3.3.5.- Caracterización de lámparas y luminarias: Goniofotómetro y Esfera de Ulbricht. ....	83
3.4.- El contexto biológico, herramientas de evaluación.....	85
3.5.- Otros instrumentos complementarios.....	87

#### **CAPÍTULO 4.- PROYECTOS Y GRUPOS DE TRABAJO RELEVANTES. .... 89**

4.1.- Introducción.....	89
4.2.- International Dark-Sky Association .....	89
4.3.- Globe at night .....	90
4.4.- Declaración de la Palma. ....	91
4.5.- Red Española de estudios sobre la contaminación lumínica.....	94
4.6.- Light Pollution Science and Technology Institute .....	96
4.7.- Iniciativa Starlight .....	96
4.8.- Programa Europeo Greenlight.....	98
4.9.- Estudio sobre la contaminación lumínica en la Universidad Complutense .....	99
4.10.- Espacio Natural de Doñana .....	100
4.11.- Proyecto 21.69 Consultoría Lumínica.....	101
4.12.- Estudio Contaminación Lumínica en el Parque Natural del Delta del Ebro ....	103

#### **CAPÍTULO 5.- MEDIDA Y EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN LUMÍNICA EN ENTORNOS**

##### **URBANOS..... 105**

5.1.- Introducción.....	105
5.2.- Normativas. ....	106
5.3.- Instrumentación. ....	107
5.4.- Contexto urbano. Alumbrado. Eficiencia energética. ....	108
5.5.- Justificación.....	108
5.6.- Instrumentación utilizada. ....	111
5.7.- Propuesta: Utilización de cámaras comerciales. ....	128
5.7.1.- Introducción.....	128
5.7.2.- Luminancímetro, ¿instrumento para medir la contaminación lumínica? - La cámara fotográfica digital como alternativa. ....	131
5.7.3.- Metodología utilizada. ....	134
5.7.4.- Estudio de los parámetros a medir y comparación con los instrumentos actuales.....	135
5.7.5.- Estudio/comparativa de los principios de funcionamiento de la cámara y su sensor.....	138
5.7.6.- Caracterización de parámetros y herramientas asociadas a la cámara. ....	141

5.7.6.1.- Introducción.....	141
5.7.6.2.- Histograma. El histograma como fuente de información. ....	143
5.7.6.3.- Codificación de color y brillo. ....	145
5.7.6.4.- Sistema sRGB.....	151
5.7.6.5.- Información suministrada por la cámara. ....	152
5.7.6.6.- Cabecera EXIF. ....	158
5.7.6.7.- Fuentes de error. Tratamiento y consideración. ....	161
5.7.6.7.1.- Error de linealidad del sensor. ....	161
5.7.6.7.2.- Error de ruido en valores bajos.....	162
5.7.6.7.3.- Error de saturación y brillo en valores altos. ....	163
5.7.6.7.4.- Error de aproximación a la respuesta fotópica. (Visión fotópica, isotópica y mesópica).....	164
5.7.6.7.5.- Errores ópticos (“vigneteo”, ... ).....	168
5.7.6.7.6.- Error de cuantización en valores bajos.....	171
5.7.6.7.7.- Errores de aproximación al EV (valores limitados de Texp, Fn, ... ) .....	172
5.7.6.7.8.- Errores del instrumento de calibración (LS-110) y otros (luminarias, led, ... ) .....	176
5.7.6.8.- Tratamiento de la fotografía. Corrección gamma. Linealización. ....	177
5.7.7.- Algoritmo de conversión. ....	180
5.7.8.- Determinación de un método para calibrar nuestra cámara .....	181
5.7.8.1.- Copias de seguridad.....	186
5.7.8.2.- Establecimiento de requisitos. ....	187
5.7.8.3.- Toma de fotografías de patrones. ....	188
5.7.8.4.- Registro y procesado en hoja Excel de los resultados. ....	189
5.7.8.5.- Obtención de un algoritmo .....	191
5.7.8.6.- Valores de exposición y brillo EV y LV. ....	192
5.7.9.- Algoritmo propuesto.....	195
5.7.10.- Validación de la propuesta. ....	201
5.7.10.1.- Introducción.....	201
5.7.10.2.- Programa CVI.....	201
5.7.10.3.- Hoja de cálculo Excel. ....	205
5.7.11.- Mediciones y resultados. ....	207
5.7.12.- Validación pruebas de campo.....	207
5.7.12.1.- Comparativa con mediciones con SQM. Mediciones y pruebas. ....	208
5.7.12.2.- Comparativa con mediciones con LS-110 (alumbrado calle) .....	209
5.7.12.3.- Comparativa con mediciones con LS-110 (parque) .....	210
5.7.12.4.- Comparativa caso eventos (Feria Málaga 2015) .....	211
5.7.12.5.- Medición de anuncios publicitarios (otras fuentes urbanas) .....	213
5.8.- Mediciones con SQM.....	214
5.9.- Señales y anuncios luminosos.....	219

---

<b><u>CAPÍTULO 6.- CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE FUTURO.....</u></b>	<b><u>223</u></b>
6.1.- Introducción.....	223
6.2.- Conclusiones. ....	226
6.3.- Líneas de futuro.....	228
6.3.1.- Líneas futuras generales .....	228
6.3.2.- Líneas de futuro particulares: .....	231
<b><u>BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS. ....</u></b>	<b><u>233</u></b>
Bibliografía .....	233
<b><u>ANEXO: PUBLICACIÓN .....</u></b>	<b><u>239</u></b>
<b><u>ANEXO: EJEMPLOS DE MEDICIONES .....</u></b>	<b><u>241</u></b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Resplandor luminoso nocturno .....	38
Figura 2 Cielo de Málaga en Feria a las 02h de la madrugada.....	40
Figura 3 Cénit del cielo de Málaga en Feria a las 02h de la madrugada .....	41
Figura 4 Línea del tiempo de Leyes de rango autonómico. ....	49
Figura 5 Línea del tiempo del desarrollo reglamentario de las leyes de rango autonómico. ....	49
Figura 6 Mapa mundial de contaminación lumínica (Fuente NASA).....	53
Figura 7 Patrones de visibilidad de Orion según escala en magnitud. (Fuente www.globe.gov) .....	55
Figura 8 Escala de Bortle (Fuente Observatorio Arval).....	55
Figura 9 Mapa de contaminación lumínica de Europa. (Fuente Cinzano).....	56
Figura 10 Ficha disponible en el programa GLOBE AT NIGHT con SQM.....	57
Figura 11 SQM Medidor de Calidad del Cielo .....	60
Figura 12 Imagen obtenida con cámara comercial y su conversión en escala de colores.....	63
Figura 13 Comparativa de la respuesta espectral entre cámaras comerciales CCD y CMOS (Fuente Teikari 2007 / Hollan 2004) .....	64
Figura 14 El espectrofotómetro WASBAM-SSH (Fuente Cinzano).....	65
Figura 15 El espectrofotómetro SAND (Fuente Aubé) .....	65
Figura 16 Instrumento Excálibur. (Fuentes David Galadí Enríquez. Observatorio de Calar Alto / <a href="http://astro-itec.es/desarrollos">http://astro-itec.es/desarrollos</a> ) .....	66
Figura 17 Imagen obtenida con objetivo ojo de pez. (Fuente Daniel Paletti – Proyecto ALPI) .....	67
Figura 18 Sistema ASTMON.....	68
Figura 19 Comparativa diurna y nocturna de Las Vegas obtenidas con un avión ER-2 (Fuente Christopher N.H. Doll).....	75
Figura 20 Ejemplo de trazado por Thierry con la ayuda del Google Hearth. (Fuente Association pour la Sauvegarde du Ciel e de l'Environnement Nocturnes ASBL) .....	76
Figura 21 Video Fotómetro LMK 98-4.....	77
Figura 22 LMK mobile advanced .....	77
Figura 23 Luxómetro Mavolux .....	79
Figura 24 Adaptador .....	79
Figura 25 Luminancímetro Konica Minolta LS-100 / LS-110.....	80
Figura 26 Respuesta espectral del LS-110 .....	81
Figura 27 Compensación según fuente iluminante .....	81
Figura 28 Ángulo de apertura en el LS-110.....	82
Figura 29 Tecnología del LS-110.....	82
Figura 30 Detalle del brazo principal del goniómetro (Fuente V. F. Muñoz y otros). ....	83
Figura 31 Esfera de Ulbricht (Fuente Indalux) .....	84
Figura 32 Declaración de la Palma .....	91
Figura 33 Mapa lumínico de Vitoria (Proyecto 21.69 Consultoría Lumínica) .....	102
Figura 34 Pentax Kx.....	111
Figura 35 Objetivo Samyang, Fish Eye CS lens. Multicoated 8mm. F3.5.....	113
Figura 36 Objetivo Pentax, smc DAL, 18-55mm 1:3,5-5,6 AL.....	113
Figura 37 Luminancímetro LS 110 Minolta Konica .....	114
Figura 38 Especificaciones luminancímetro LS 110.....	114
Figura 39 Luxómetro LM-20 .....	115

Figura 40	Polaris SPD100.....	116
Figura 41	Especificaciones Polaris SPD100.....	116
Figura 42	Banco de fotografía LAIK.....	117
Figura 43	Plantilla de tonos grises.....	118
Figura 44	X-rite colorchecker passport card.....	118
Figura 45	Sekonic Exposure Target I JQ-57.....	119
Figura 46	Puntos especificados Sekonic Exposure Target I JQ-57.....	119
Figura 47	Sky Quality Meter (Fuente Unihedron).....	120
Figura 48	Especificaciones SQM LU.....	121
Figura 49	Programa medición con SQM.....	121
Figura 50	Polímetro Fluke 8010A.....	122
Figura 51	Algunas fuentes de luz utilizadas.....	123
Figura 52	Filtro fotópico.....	124
Figura 53	Características filtro fotópico FPE-5040 UQG Optics.....	124
Figura 54	GPS Garmin Etrex.....	125
Figura 55	GPS Phoenix Bluetooth.....	126
Figura 56	GPS Haicom HI-305 III.....	126
Figura 57	Cámaras específicas.....	128
Figura 58	Apogee Alta U16M.....	129
Figura 59	CX-2 IMAGING LUMINANCE METER.....	129
Figura 60	Aplicación típica del CX-2.....	130
Figura 61	Especificaciones CX-2.....	130
Figura 62	Principio de funcionamiento del luminancímetro. Diagrama de bloques. (Minolta).....	138
Figura 63	Principio de funcionamiento de la cámara digital DSLR.....	139
Figura 64	Ajuste de rangos.....	142
Figura 65	Diferente exposición en una misma escena.....	143
Figura 66	Histogramas obtenidos con Pentax Digital Camera Utility 4.....	144
Figura 67	Histogramas obtenidos con PhotoME.....	144
Figura 68	Histogramas obtenidos con la aplicación CVI desarrollada.....	145
Figura 69	Escala cromática.....	146
Figura 70	Curva fotópica CIE.....	147
Figura 71	Modelos de color.....	148
Figura 72	Traslado del rango dinámico.....	153
Figura 73	Medición de luz reflejada (a) o incidente (b) (Manual Polaris SPD100).....	153
Figura 74	Modos de medición luminosidad.....	154
Figura 75	PhotoME.....	158
Figura 76	PhotoME cabecera.....	158
Figura 77	PhotoME datos imagen.....	159
Figura 78	PhotoME datos imagen 2.....	159
Figura 79	PhotoME información lectura segmentos.....	160
Figura 80	PhotoME información gráfica lectura segmentos.....	160
Figura 81	Respuesta fotópica filtro UQG Optics.....	164
Figura 82	Respuesta espectral LS-110.....	166
Figura 83	Sistemas de excitación de píxeles.....	167
Figura 84	Coeficientes de matriz de transformación del espacio de color según la cabecera EXIF... ..	168

Figura 85 Coeficientes RGB a YCbCr.....	168
Figura 86 Efecto de borde según área captada (RED.com) .....	169
Figura 87 Distribución no homogéa.....	170
Figura 88 Diafragmas y área circular.....	175
Figura 89 Tiempo de exposición según cabecera EXIF.....	175
Figura 90 Respuestas lineal y corregida.....	177
Figura 91 Corrección gamma.....	178
Figura 92 Valores típicos de gamma.....	179
Figura 93 Patrón ejemplo de bajo contraste (20:1) ISO 14524 camera OECF test chart.....	183
Figura 94 Patrón base confeccionado para las pruebas.....	183
Figura 95 Patrones base comerciales utilizados.....	184
Figura 96 Sugerencia comité técnico ISO/ TC42.....	184
Figura 97 Recomendación ISO 12233 .....	184
Figura 98 Recomendación Sekonic.....	184
Figura 99 Aproximación lineal .....	185
Figura 100 Escala EV.....	194
Figura 101 Distribución brillos en 6 EVs.....	197
Figura 102 Aproximación por EV.....	198
Figura 103 Ejemplos de pseudofotografías de colores.....	200
Figura 104 Píxeles diferentes .....	202
Figura 105 Panel de usuario de la aplicación CVI.....	204
Figura 106 Hoja Excel para cálculos y resultados. ....	206
Figura 107 Medición del cénit del cielo para validar con SQM.....	208
Figura 108 Farola sobre calzada y vehículo aparcado .....	209
Figura 109 Mediciones en parque público .....	210
Figura 110 Figura Mediciones en parque público - Variando pseudofotografía.....	211
Figura 111 Halo producido por evento, feria de Málaga.....	212
Figura 112 Pseudofotografías de colores de vallas publicitarias. ....	213
Figura 113 SQM Reader - Pantalla .....	215
Figura 114 SQM Reader- Fichero de texto registro.....	215
Figura 115 Registro SQM noche del 29/08/15 al 30/08/15.....	216
Figura 116 Registro SQM noche del 31/08/15 al 01/09/15.....	217
Figura 117 Ejemplo seguimiento brillo cielo nocturno con SQM (Fuente REECL) .....	218
Figura 118 Extracto ITC-EA-02 .....	219
Figura 119 Extracto ITC-EA-03 .....	220
Figura 120 Publicación Revista DYNA .....	240

---

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Evolución normativas en España .....	46
Tabla 2 Línea del tiempo desarrollo normativas en España.....	47
Tabla 3 Características LM-20.....	115
Tabla 4 Características Sekonic Exposure Target I - JQ-57.....	119
Tabla 5 Valores EV y combinaciones de exposición .....	173
Tabla 6 Tabla de áreas para diferentes diafragmas .....	174

---

# Capítulo 1 - Introducción

---

## 1.1.- Motivación.

Coincidiendo con el planteamiento inicial de este trabajo y la reciente aparición del decreto 357/2010, de 3 de agosto de la Junta de Andalucía por el que se aprueba el reglamento de la calidad del cielo nocturno frente a la contaminación lumínica y el establecimiento de medidas de ahorro y eficiencia energética, se estaban produciendo cambios sustanciales tanto en lo referente a normativas y requerimientos técnicos para su aplicación como en lo referente a tecnologías de alumbrado e instrumentación.

Así, en la guía técnica (García Gil, 2011) editada por la Junta de Andalucía para la adaptación de las instalaciones de alumbrado exterior a dicho decreto, en lo referente a la instrumentación utilizable para las mediciones necesarias, se menciona (pg. 95):

***“Nuevas tendencias en medidas de niveles:***

*La fotografía digital apunta como la nueva metodología de medición lumínica. Se aplica ya en casos específicos ..., pero los equipos y procesos son aún muy complejos y costosos.*

*Se trabaja ya en el desarrollo de equipos y metodologías aplicables a la gestión práctica de instalaciones.”*

El estudio y desarrollo de equipos y metodologías aplicables a la gestión práctica de instalaciones y, en particular, en lo concerniente a equipos de medición lumínica orientados a tales fines se convirtió así en uno de los principales motivos y objetivos de esta tesis. La trayectoria profesional del autor en el terreno de la instrumentación electrónica en el Departamento y Área de Tecnología Electrónica y las líneas de trabajo del Área de Proyectos de Ingeniería del Departamento de Expresión Gráfica, Diseño y Proyectos, que impartía el Programa de Doctorado, en el terreno de la contaminación lumínica se constituyeron así en una base idónea para la propuesta de este proyecto de tesis.

Resulta así mismo motivadora, a modo de ejemplo, la consideración 9 que hace el Reglamento (CE) N° 245/2009 de la Comisión de 18 de marzo de 2009 por el que se aplica la Directiva 2005/32/CE del Parlamento Europeo y del Consejo (Comisión\_de\_las\_comunidades\_europeas, 2009):

*“(9) A falta de métodos científicos consensuados internacionalmente para la medición de su impacto medioambiental, no ha podido evaluarse la importancia de la denominada «contaminación lumínica». Sin embargo, está admitido que las medidas desarrolladas para incrementar la eficacia luminosa de los dispositivos de iluminación del sector terciario pueden tener un impacto positivo en la «contaminación lumínica».”*  
(Comisión\_de\_las\_comunidades\_europeas, 2009)

Esta afirmación, con independencia del objeto de la Directiva, deja claro que en los momentos del comienzo de este trabajo la contaminación lumínica no ha alcanzado aún un consenso internacional en lo relativo a los métodos científicos para su medición y evaluación. Consecuentemente, esta tesis se plantea así mismo contribuir, en la medida de sus posibilidades, en la obtención de métodos científicos para la medición y evaluación de la contaminación lumínica.

## 1.2.- Presentación.

La presente tesis doctoral se enmarca en las líneas de trabajo del Área de Proyectos del Departamento de Expresión Gráfica, Diseño y Proyectos, en el contexto de la contaminación lumínica, en colaboración con el Departamento de Tecnología Electrónica, de la Universidad de Málaga.

En los últimos tiempos la palabra contaminación resulta especialmente sensible en nuestra sociedad, generalmente vista como daño colateral del avance de la tecnología y desarrollo de la modernidad. Hablar de contaminación nos lleva inmediatamente a conceptos de medioambiente, cambio climático, destrucción del entorno y otras ideas asociadas con aspectos negativos y perjudiciales para la naturaleza. En términos generales se habla de contaminación ambiental bajo conceptos como emisiones de gases a la atmósfera, contaminación de residuos en entornos naturales, vertidos, plásticos, CO<sub>2</sub> y todo un conjunto

de efectos perjudiciales para la naturaleza con efectos negativos sobre su equilibrio. Probablemente, y aunque aún no exista una conciencia real del problema, la contaminación sea uno de los mayores peligros que afecta a nuestro planeta.

Junto a este concepto general de contaminación ambiental, en los últimos años se están desarrollando estudios y constatación de nuevas expresiones de contaminación. Tal es el caso de la contaminación acústica y, en nuestro caso, la contaminación lumínica.

En su Informe de Medio Ambiente en Andalucía de 2010 (Junta\_de\_Andalucía, Medio ambiente en Andalucía - Informe 2010, 2010) (pág. 86), coincidiendo con el inicio de esta tesis, la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía ya menciona la contaminación lumínica como fuente de preocupación ciudadana a considerar en el medio urbano:

### ***Medio ambiente urbano***

*Los problemas asociados al entorno más inmediato se incorporan a la conciencia ambiental de la ciudadanía según se perciben sus efectos negativos en la calidad de vida y el bienestar general de la población. Así, la contaminación acústica, que no hace demasiados años ni siquiera era objeto de debate, ha pasado a formar parte de la preocupación de la ciudadanía. En la actualidad ocupa uno de los primeros lugares en la lista de problemas ambientales citados a escala local. **Otro tanto podría decirse de la contaminación lumínica**, que año a año cobra protagonismo entre los problemas del medio urbano. (Junta\_de\_Andalucía, Medio ambiente en Andalucía - Informe 2010, 2010)*

La contaminación lumínica, que se introducirá con más detalle en este estudio, se refiere a los efectos perjudiciales de la emisión de luz, en particular por la noche, con intensidades, direcciones o rangos espectrales inadecuados para la realización de las actividades previstas en las zonas alumbradas.

Uno de los primeros efectos perjudiciales que se observaron de la contaminación lumínica se produjo en el contexto astronómico. En las últimas décadas los astrónomos han constatado la pérdida de la visibilidad de los astros en el cielo nocturno por efectos del brillo producido por la contaminación lumínica. En esta línea se empezaron a movilizar los primeros estudios, reacciones y propuestas de medidas para contrarrestar los efectos perjudiciales provocados. Sin embargo estos efectos negativos no se presentan sólo en dicho contexto y se están desarrollando diversos estudios en otros contextos como el de la

naturaleza (efectos sobre la fauna y la vegetación) e incluso sobre la salud en las personas. A estos efectos directos se suman otros efectos indirectos de tanta o quizás mayor importancia. En este sentido las principales fuentes de la contaminación lumínica se encuentran en el alumbrado nocturno. La energía consumida por dicho alumbrado procede de fuentes contaminantes cuyos efectos negativos sobre el medio ambiente y el futuro del planeta no ofrecen hoy ninguna duda. Este hecho se agrava aún más si dicho consumo energético no se destina a un uso productivo sino que se despilfarra en “*intensidades, direcciones o rangos espectrales inadecuados*” como es el caso de la contaminación lumínica. Por este motivo la contaminación lumínica ofrece un doble aspecto que agrava su importancia, un aspecto directo por sus efectos perjudiciales y un aspecto indirecto por su contribución negativa a la contaminación ambiental producida por el consumo energético (emisiones de gases contaminantes, agotamiento de recursos naturales, vertidos, ...)

Actualmente existen numerosos trabajos orientados al estudio de la contaminación lumínica y de propuestas de medidas para su corrección, evaluación y medida. Muchos de estos trabajos proceden de fuentes astronómicas como contexto perjudicado. Otra parte importante de los mismos se orienta al contexto del alumbrado público como principal causa de la misma. Entre las líneas de trabajo más destacadas se encuentran los estudios de los efectos sobre los distintos contextos, los estudios de las medidas correctoras y paliativas y los estudios de las herramientas de evaluación y medición de la contaminación lumínica. En paralelo, y sin duda como consecuencia, en los últimos años también se viene observando un avance en las normativas y regulaciones que implican a la contaminación lumínica. En este sentido se hace necesario disponer de herramientas e instrumentos para la medición y evaluación de la misma que permitan establecer valores, rangos y limitaciones a los mismos.

La contaminación lumínica presenta distintos aspectos a considerar a la hora de su evaluación. Aspectos diferentes como “intensidades”, “direcciones”, “rangos espectrales” o “uso inadecuado” ocasionan que no se pueda disponer de un único instrumento o parámetro para la cuantización numérica de este concepto de contaminación lumínica.

Del mismo modo también existen distintos contextos sobre los que aplicar la evaluación, por una parte de la contaminación lumínica recibida por unos y, por otra, de la contaminación lumínica generada por otros. En este último aspecto, el marco de las

---

instalaciones de alumbrado se establece como una de las principales fuentes generadoras de contaminación lumínica.

Las incipientes normativas y regulaciones que están empezando a desarrollarse intentan abarcar los tres aspectos principales de la definición de contaminación lumínica. El aspecto “intensidades” inadecuadas se contempla con la limitación de valores máximos permitidos. El aspecto de “direcciones” inadecuadas se contempla con la limitación del flujo hemisférico superior máximo permitido así como de las áreas alumbradas y objetivos. El aspecto “rangos espectrales” inadecuados se contempla con la especificación de tipos fuentes de luz. Finalmente, el “uso inadecuado” y las limitaciones de efectos perjudiciales se contempla con la especificación de zonas, áreas y horarios.

En todos los casos se requiere de unos instrumentos para la medida y evaluación de los parámetros especificados. Los instrumentos más inmediatos para la medición de la intensidad luminosa son el luxómetro que nos permite medir el flujo luminoso recibido por una superficie y el luminancímetro que nos permite medir la intensidad de la luz emitida por una fuente en una dirección dada por área proyectada de una superficie luminosa o reflectante. El primero de ellos es un instrumento más extendido y menos costoso por su uso en el contexto de la fotografía ya que es utilizado por los fotógrafos para medir la luz recibida o reflejada por la escena a fotografiar. Sin embargo el luminancímetro es un aparato más costoso pues su uso no está tan extendido como el del primero. Así mismo el luminancímetro presenta el inconveniente, para nuestra aplicación, de medir la intensidad de luz emitida por un punto luminoso (abarcando determinado ángulo, generalmente reducido). Para la evaluación de un escenario concreto (de la cúpula estelar en astronomía, de una zona iluminada, de una instalación de alumbrado, ...) se requeriría poder determinar los valores máximos alcanzados en todos los puntos de la escena así como los valores medios y distribuidos. El uso de mediciones puntuales realizadas con un luminancímetro convierte esta tarea en tediosa y susceptible de errores, pues implica la realización de múltiples mediciones para cubrir todo el área implicada así como valoraciones subjetivas del usuario que realiza la medida. Por otra parte, la utilización del luminancímetro para medir la luminancia de las fuentes y escenas procede de una intención original de evaluar la calidad del alumbrado y su eficiencia. En este trabajo también se cuestiona dicho instrumento en el sentido de que su respuesta es fotópica (sensibilidad del ojo humano) en tanto que los perjuicios de la contaminación lumínica

abarcan espectros fuera de esta respuesta por lo que puede resultar cuestionable la herencia de este instrumento como herramienta de evaluación de la contaminación lumínica o, al menos, de algunos aspectos de ésta.

En consecuencia se hace necesario el desarrollo y estudio de herramientas que faciliten la medición de los parámetros asociados a la contaminación lumínica. En este sentido se están desarrollando y presentando distintos métodos y sistemas para tal fin. Una de las alternativas más prometedoras en los distintos contextos mencionados es la utilización de cámaras fotográficas electrónicas que ofrecen información lumínica de todos los puntos de la escena fotografiada. Las principales ventajas de este sistema consisten en que en una sola toma se obtiene información simultánea sobre todos los puntos de la escena, evitándose tener que realizar múltiples mediciones barriendo la misma. También tiene como ventaja la posibilidad de trasladar directamente esta información a un soporte informático que permita la evaluación y procesado de los resultados (valoración media, máximos, ...). Ya existen antecedentes a esta propuesta, en particular en el marco astronómico, y las mismas se han multiplicado en paralelo al desarrollo de esta tesis. Trabajos internacionales y nacionales así como incluso patentes se están actualmente desarrollando en este ámbito, algunos de ellos ampliamente referenciados (Cinzano, A portable spectrophotometer for light pollution measurements, 2004), (Rabaza Castillo, Aznar Dols, Espín Estrella, & Peña García, 2012). Igualmente en paralelo, en los últimos años se ha producido una expansión de la tecnología y oferta de mercado de las mencionadas máquinas fotográficas digitales con importantes avances en sus prestaciones así como descenso en sus costes.

En las primeras propuestas del uso de cámaras fotográficas se recurría esencialmente a cámaras específicas, no comerciales o gran público. En el contexto astronómico, que como se ha mencionado fue de los primeros en afrontar la contaminación lumínica, se recurrió a cámaras o detectores específicos para uso astronómico que incluyen prestaciones particulares como el uso de filtros incorporados y otras. Este uso específico así como la tecnología implicada hace que dichos aparatos resulten costosos, en particular para una utilización extendida o generalizada. También han aparecido otras alternativas de más bajo coste, en el mismo marco astronómico. Tal es el caso del SQM (Sky Quality Meter), un instrumento de bajo coste que permite evaluar la calidad (brillo) del cielo nocturno (en el sentido de

contaminación lumínica) y que ha presentado una alta aceptación y desarrollo de estudios basados en el mismo.

En los últimos años se ha producido un apreciable avance y desarrollo de la tecnología electrónica digital en todos los contextos (informática, telefonía, comunicaciones, imagen y sonido, ...) y, como no podía ser de otra manera, en la fotografía digital. En este sentido se han incrementado las prestaciones de las cámaras fotográficas digitales y decrementado sus costes. Como en muchos otros contextos, una cámara digital comercial actual ofrece prestaciones y características que hace unos años podían considerarse de alta gama profesional y de elevado coste. Otro avance tecnológico que ha cambiado drásticamente en los últimos años y que, consecuentemente, requiere un estudio de su implementación y consecuencias, ha sido la introducción de la tecnología LED en el alumbrado.

En el contexto de la contaminación lumínica en entornos urbanos la principal necesidad de instrumentación de medida se encuentra en la aplicación de las normativas que regulan las instalaciones de alumbrado. En términos generales, al margen de otras consideraciones que se verán, las normativas vienen a establecer valores mínimos y/o máximos de luminancia e iluminancia para diferentes entornos y circunstancias. Para la medida de luminancia se establece el luminancímetro como instrumento a utilizar. Este aparato, además de los inconvenientes mencionados, resulta poco eficiente a la hora de establecer máximos en un área determinada o de evaluar valores medios en la misma.

Recientemente se han puesto en vigor leyes y normativas relativas a la contaminación lumínica, tal es el caso del Decreto 357/2010, de 3 de agosto de la Junta de Andalucía, por el que se aprueba el Reglamento para la protección de la calidad del cielo nocturno frente a la contaminación lumínica y el establecimiento de medidas de ahorro y eficiencia energética. En su artículo 10 este Decreto establece que “los requerimientos y niveles de iluminación para los distintos tipos de alumbrado serán los que se recogen en las Instrucciones Técnicas Complementarias ITC-EA-02 e ITC-EA-03 del Real Decreto 1890/2008, de 14 de noviembre, así como en los artículos siguientes”. En lo relativo a la medida de luminancias puntuales estas instrucciones técnicas fijan el uso de un luminancímetro con un medidor de ángulo no mayor de 2' en la vertical, y entre 6' y 20' en la horizontal, en tanto que para la medida de la luminancia media establecen el uso de un luminancímetro integrador, con limitadores de

campo que correspondan a la superficie a medir (100 m de longitud por el ancho de los carriles de circulación). En ambos casos se trata de instrumentos especiales de elevado coste y que requieren su manejo por personas habituadas a su uso. Así mismo las especificaciones de las medidas a realizar resultan tediosas y, en algunos casos, poco definidas. En contrapartida, la fotografía digital permite que en una sola toma se adquieran los valores relativos a todos los puntos de la escena y se almacenen para un posterior procesado de cuantos valores y áreas se estimen (máximos, valores medios, superficies, ...)

### **1.3.- Introducción.**

Para poder establecer los requisitos de un sistema de medida y evaluación se hace necesario entablar previamente las bases de los parámetros y magnitudes que se desean medir y evaluar. La contaminación en general y la contaminación lumínica en nuestro caso no tienen un único parámetro a medir que las defina y permitan cuantificar su valor en términos absolutos. La contaminación lumínica tiene aspectos, contextos y consideraciones que requerirán diversos parámetros a considerar y evaluar. Se tendrá pues que establecer, previamente al estudio, unas definiciones de la propia contaminación lumínica así como de los mencionados parámetros y particularidades a considerar. En este sentido, el comienzo de este trabajo se establece en la memoria del período de investigación de los cursos de doctorado y consistió en un estudio del estado del arte de la contaminación lumínica y punto de partida para esta tesis. Habiendo transcurrido algunos años desde dicho trabajo y dándose la circunstancia de que tanto el entorno de la contaminación lumínica como, en particular, las tecnologías electrónicas digitales han presentado un considerable avance, se hace necesario actualizar algunos datos y ello nos permitirá constatar los avances alcanzados, el estado actual y las líneas de futuro previsibles.

### **1.4.- Objetivos.**

En este trabajo se evalúa la medición de la contaminación lumínica en términos globales aplicados a los entornos urbanos y en lo relativo a la instrumentación necesaria. Así mismo se proponen soluciones técnicas para dicha medición.

El entorno urbano presenta una doble perspectiva del contexto de la contaminación lumínica. Por una parte como elemento receptor de los efectos adversos de la misma y, por otra parte, como principal elemento generador de ésta.

Tras un estudio de diferentes propuestas y métodos de medición en los distintos contextos, en los primeros capítulos de esta memoria, se propone el uso de la fotografía digital como herramienta para tal fin. Si bien el uso de cámara fotográficas especiales ya se ha propuesto en algunos contextos, en particular en astronomía, con este trabajo se pretende aportar nuevas perspectivas y consideraciones en esta línea. Se aprovecha el auge tecnológico de los últimos años para incorporar la cámara comercial como alternativa a las cámaras específicas para la medición de luminancias. El desarrollo y aplicación de las normativas surgidas para el control de la contaminación lumínica en el contexto urbano obligará a que sean incontables los técnicos y operarios de administraciones autonómicas y locales, oficinas técnicas, empresas instaladoras y otras entidades que necesitarán de instrumentos para evaluar el cumplimiento de estas normativas en sus proyectos. Del luminancímetro, como uno de los aparatos elementales a utilizar en esta tarea, ya se ha dicho que es un instrumento costoso y específico que además presenta algunos inconvenientes que se verán. La fotografía digital se presenta como una alternativa de menor coste, al alcance de cualquier persona u entidad y que además presenta soluciones y ventajas añadidas como el procesado informatizado de la información de todos los puntos de la escena. Las cámaras digitales no están inicialmente concebidas como instrumentos de medida sino para captar imágenes y reproducirlas no siempre con la mayor fidelidad posible sino que pueden incluir correcciones y/o compensaciones con fines fotográficos y que alteran la linealidad que una medición debe tener. Así, la respuesta de los dispositivos que reproducirán la fotografía e incluso la propia percepción humana obligan a los fabricantes de cámaras fotográficas a incluir compensaciones y correcciones para provocar mejores sensaciones a la hora de visualizar la imagen reproducida.

Para poder utilizar la información contenida en una fotografía digital con fines de medición de luz habrá que eliminar y/o compensar estas correcciones para obtener la linealidad requerida para medir proporcionalidades. Desgraciadamente estas compensaciones no siempre son las mismas y los fabricantes pueden aplicar particularidades propias con objeto de realzar determinados matices y/o dotar a sus cámaras de características específicas

con la idea de atraer al usuario y ofrecer prestaciones artísticas o atractivas (realce de contrastes, colores, brillos, ...)

Uno de los objetivos de este trabajo será proporcionar técnicas y métodos para obtener una función que permita extraer parámetros de luminancia a partir de la información entregada por el fichero que contiene la fotografía.

Finalmente cabe indicar que el contexto en el que se desarrolla este trabajo es la medición de la contaminación lumínica en términos generales pero en particular en el ámbito de las instalaciones de alumbrado y en el marco de los entornos urbanos como principal origen de la misma.

## 1.5.- La contaminación lumínica.

De la lectura de diferentes textos relacionados se pueden obtener distintas definiciones, no necesariamente incompatibles, del concepto de contaminación lumínica. Entre las más aceptadas puedan estar las utilizadas por algunas normativas. La visión contaminante del concepto se puede asociar a su definición como “una alteración del medio producida por un sistema de alumbrado nocturno poco eficaz, con consecuencias sobre la biodiversidad y sobre el hombre” (Rodríguez\_Font). Esta primera definición queda muy abierta a interpretaciones y desde luego no establece un punto de partida que nos permita hablar de parámetros medibles. Por otra parte, una definición que contempla aspectos más técnicos podría ser la de “la emisión de flujo luminoso por fuentes artificiales de luz constituyentes del alumbrado nocturno, con intensidades, direcciones o rangos espectrales inadecuados para la realización de las actividades previstas en la zona alumbrada” (García Gil, 2011). Esta segunda definición ya incluye parámetros y aspectos más cuantificables y medibles. Existen otras definiciones como “El resplandor luminoso nocturno o contaminación lumínica es la luminosidad producida en el cielo nocturno por la difusión y reflexión de la luz en los gases, aerosoles y partículas en suspensión en la atmosfera, procedente, entre otros orígenes, de las instalaciones de alumbrado exterior, bien por emisión directa hacia el cielo o reflejada por las superficies iluminadas” que hace el IDAE en el “Protocolo de auditoría energética de las instalaciones de alumbrado público exterior” (IDAE, 2008) siguiendo la misma definición que hace el Real Decreto 1890/2008 por el que se aprueba el Reglamento de

---

eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus instrucciones técnicas complementarias ITC-EA-01 a ITC-EA-07 (RD\_1890/2008, 2008).

Según el diccionario de la RAE, la palabra “contaminación” significa “acción y efecto de contaminar”, en tanto que se define como “contaminar” “alterar nocivamente la pureza o las condiciones normales de una cosa o un medio por agentes químicos o físicos.”

Consecuentemente resultan claves los conceptos de “nocividad” y de “pureza o condiciones normales”. Bajo el segundo concepto la mera iluminación artificial nocturna podría considerarse como contaminación puesto que el estado natural de la noche es de oscuridad. Ahora bien, al aplicarle el primer concepto de nocividad se particulariza la alteración de este estado natural a la nocividad de la misma. Es aquí donde aparecen o pueden aparecer distintas interpretaciones al concepto de contaminación lumínica. En el marco astronómico la nocividad responde al perjuicio que provoca la iluminación nocturna sobre el brillo o resplandor nocturno con sus efectos nocivos sobre el contraste entre los objetos estelares y el fondo. En el marco energético el efecto nocivo radica, fundamentalmente, en la eficiencia energética de las instalaciones de alumbrados, considerándose, por tanto, como contaminación toda “emisión de flujo luminoso por fuentes artificiales de luz constituyentes del alumbrado nocturno, con intensidades, direcciones o rangos espectrales inadecuados para la realización de las actividades previstas en la zona alumbrada”. Si bien aplicable en todos los aspectos de la contaminación lumínica, en el marco energético en particular, toda la energía gastada inadecuadamente para la realización de las actividades previstas en la zona alumbrada va en detrimento directo de dicha eficiencia energética. Finalmente, en el marco de las consecuencias biológicas, los efectos nocivos son diversos y variados lo que no impide que se puedan generalizar en la alteración no natural o artificial del equilibrio biológico.

En ámbitos internacionales se habla más de “polución” (“light pollution” en inglés, “pollution lumineuse” en francés) que de contaminación. Con independencia del contexto idiomático, en español también sería aceptable dicha terminología. La RAE define como polución la “contaminación intensa y dañina del agua o del aire, producida por los residuos de procesos industriales o biológicos” (aún no se ha ampliado el contexto de contaminación y se habla de contaminación del aire y/o del agua). En este sentido una tercera definición de la contaminación lumínica nos la da el CIE (Comité Internacional del Alumbrado), en su

publicación nº 126 “Directrices para la minimización del brillo del cielo” como “un término genérico que indica la suma total de todos los efectos adversos de la luz artificial”.

Consecuentemente la definición de “la emisión de flujo luminoso por fuentes artificiales de luz constituyentes del alumbrado nocturno, con intensidades, direcciones o rangos espectrales inadecuados para la realización de las actividades previstas en la zona alumbrada” resulta pues la que mejor se adapta a nuestro contexto, sin que por ello obviemos las otras. Sí será cierto que las normativas y reglamentos de alumbrado público centrarán gran parte de su redacción en estos conceptos.

Al hablar de “intensidades, direcciones o rangos espectrales inadecuados para la realización de las actividades previstas en la zona alumbrada” se concentran varios conceptos que afectan a la contaminación lumínica, sus efectos e incluso la normativa que le regula.

La idea de “intensidades” obliga a la medida de la luminosidad necesaria para cada aplicación del alumbrado artificial. Así la sobre iluminación es una forma de contaminación lumínica en tanto que supone una aplicación no necesaria de un sobre consumo energético. Los aspectos de sobre iluminación se presentan en instalaciones con mayor iluminación de la necesaria para sus fines así como en la iluminación innecesaria de zonas ó áreas que no requieran de la misma (casos de playas y zonas alumbradas nocturnamente sin que medie la necesidad). En este sentido, las normativas y regulaciones deben expresar los niveles de iluminación necesarios mínimos y/o máximos permisibles para cada aplicación y/o zona regulada. Así mismo estas normativas contemplan, entre otros, horarios e incluso la dependencia de los niveles de iluminación con los mismos.

La idea de “direcciones” inadecuadas origina conceptos y aspectos contemplados en el ámbito de la contaminación lumínica. Bajo este criterio se tienen los siguientes conceptos:

- Dispersión de luz hacia el cielo: La emisión de luz hacia el cielo conlleva una doble consecuencia. Por una parte la energía consumida comporta un gasto innecesario puesto que dicha luz no tiene utilidad alguna. Por otra parte se produce el efecto conocido como “skyglow”, brillo o resplandor en el cielo que implica toda luz dirigida directamente hacia el cielo. Su expresión más evidente es el

característico halo luminoso que recubre las ciudades, visible a centenares de kilómetros según los casos, y las nubes refulgentes como fluorescentes. Como detalle anecdótico e ilustrativo se puede mencionar el hecho de que el halo de Madrid se eleva 20 Km. por encima de la ciudad y el de Barcelona es perceptible a 300 Km de distancia, desde el Pic du Midi y las sierras de Mallorca. En condiciones normales, los navegantes podrían ir de Mallorca a Barcelona de noche, simplemente guiándose por el resplandor del halo.

En este contexto se habla del FHS ó Flujo Hemisférico Superior, también llamado Flujo hacia el Hemisferio Superior, que se refiere al flujo luminoso dirigido hacia el cielo. Este parámetro se utiliza en las normas que regulan las características que deben tener las instalaciones de alumbrado.

El brillo resultante del cielo provoca la pérdida de contraste que permite la visibilidad de los astros en la noche. Es el principal origen de los perjuicios que provoca la contaminación lumínica en el entorno de la astronomía. Así mismo este halo luminoso produce efectos sobre la biodiversidad circundante al foco.

Existen trabajos que abogan por una problemática mayor cuando la dispersión se produce en direcciones más horizontales que verticales.

- Intrusión lumínica: Consiste en la emisión de luz hacia destinos no deseados. La forma más destacada de este tipo de contaminación es la iluminación de zonas domésticas (fachadas, ventanas, propiedades privadas, ...). Esta iluminación no deseada no sólo resulta innecesaria sino que en muchas ocasiones resulta perjudicial y con efectos negativos sobre personas y entorno.
- Deslumbramientos: Tanto por intensidades excesivas como por diferencias bruscas en niveles de intensidades, el deslumbramiento consiste en la pérdida de visibilidad debida a un punto o zona de excesiva iluminación. El mismo deslumbramiento impidiendo la visibilidad sobre el resto de zonas (diferencias de contrastes) o debida a un cambio brusco en la intensidad recibida y que requiere un tiempo de adaptación del ojo al nuevo nivel (por ejemplo salida o entrada en un túnel con

apreciable diferencia de iluminación con el exterior). Sus efectos perjudiciales más inmediatos se presentan en la conducción (deslumbramiento del conductor por cambios bruscos de intensidad lumínica (la propia instalación de alumbrado, otros vehículos, entrada/salida de túneles, zonas con distinta iluminación, señales luminosas,...) así como en el contexto urbano (perjuicios en el objetivo inicial del alumbrado).

Así mismo se habla de distintas formas en que la luz es emitida hacia direcciones inadecuadas, en particular el cielo:

- Directa: Cuando la luz se emite directamente desde la fuente hacia el cielo (salvo contadas excepciones intencionadas, este tipo de emisión es contaminante en su totalidad.)
- Indirecta:
  - Reflexión de la luz en superficies iluminadas.
  - Refracción de la luz en partículas de la atmósfera.
  - Transmisión de la luz a través de un gas o un cuerpo translúcido.

En tercer lugar, la idea de “espectros” abarca, a su vez, aspectos a considerar en el marco de la contaminación lumínica:

- Desde el punto de vista astronómico, la espectrografía puede tener aspectos positivos frente a la contaminación lumínica. Así, diferencias de espectro o longitudes de onda entre emisiones contaminantes y radiaciones provenientes de cuerpos celestes permiten la utilización de filtros que eliminen las componentes no deseadas y permitan la observación de éstos.
- Desde el punto de vista energético, la contaminación lumínica, al emitir radiaciones no siempre necesarias (ultravioletas, infrarrojos, ...) supone un consumo energético innecesario y perjudicial (tanto económica como ecológicamente).

- Desde el punto de vista biológico, determinadas longitudes de onda inapropiadas en magnitud y/o en tiempo (horarios) pueden tener efectos perjudiciales en entornos biológicos y sus consecuencias (cadenas de dependencias).

Otra consideración de interés, sobre la contaminación lumínica, es su interacción con otras contaminaciones. Bajo este aspecto, la contaminación luminosa procede, en su mayoría, de fuentes de energía contaminantes (emisión de CO<sub>2</sub>, humos, degradación del medio, ...). Consecuentemente, la lucha contra la contaminación lumínica no sólo contempla el aspecto de minimizar sus efectos directos mencionados sino que tiene el añadido del efecto de minimizar el efecto indirecto de la contaminación energética.

En conjunto una preocupación cada vez más considerada por los organismos reguladores es el concepto de sostenibilidad, en nuestro caso sostenibilidad de los sistemas urbanos. La propia Junta de Andalucía en su informe “Bases para un Sistema de Indicadores de Medio Ambiente Urbano en Andalucía” señala a la contaminación lumínica como uno de los factores de esta insostenibilidad de los sistemas urbanos. (Castro Bonaño, Salvo Tierra, Márquez Moya, & Alcántara Valero, 2001)

Otro aspecto a considerar es el relativo a los efectos de la contaminación lumínica directamente sobre la salud humana y donde queda campo para el estudio y la investigación. Así se habla de sus efectos no sólo físicos sobre la salud sino incluso psíquicos como alteración del comportamiento, agresividad, alteración del sueño ...

Finalmente hay más consideraciones relativas a los efectos perjudiciales de esta contaminación. Cabe destacar efectos secundarios, no por ellos despreciables. Como ya se ha indicado, se tiene el efecto indirecto que se produce sobre la contaminación medioambiental, en el sentido clásico. Por una parte, la energía despilfarrada en contaminación lumínica, amén de su coste económico, supone una contaminación ambiental en tanto que las fuentes de estas energías son contaminantes. Pero no es sólo este el único efecto secundario sobre otras contaminaciones. Valga de muestra considerar que la mayoría de las instalaciones de alumbrado, por ejemplo las luminarias, tienen su vida útil basada en las horas de funcionamiento. Una vez acabada la vida útil, estas instalaciones se convierten en material de desecho contaminante, algunas muy contaminantes (bombillas de vapor de mercurio,

fluorescentes,...). Unas de las medidas contra la contaminación lumínica es la regulación horaria. La reducción de horas de uso aumenta la vida útil de las instalaciones y, en consecuencia, reduce la contaminación ambiental mencionada.

En su guía “Guide on the limitation of the effects of obtrusive light from outdoor lighting installations” (CIE\_150, 2003), la Comisión Internacional del Alumbrado (CIE) expone una relación muy completa de los efectos nocivos de la contaminación lumínica que puede ir desde algunos insospechados como el retraso del crecimiento de los cultivos de arroz hasta los conocidos problemas para el entorno astronómico.

## 1.6.- Consideraciones.

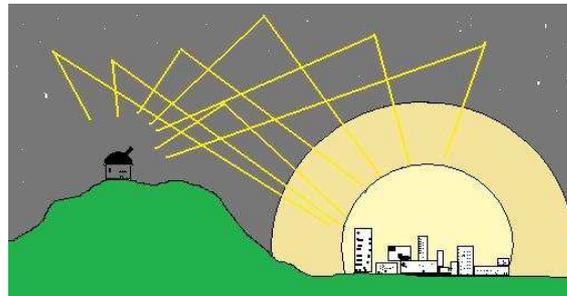
A la hora de evaluar la contaminación lumínica hemos de considerar aspectos diferentes de la misma que nos llevan a parámetros distintos a evaluar. En este sentido la contaminación lumínica presenta diferentes contextos sobre los que evaluar su magnitud:

- Contexto energético. Consistirá en evaluar la energía gastada que se pierde en iluminar zonas o áreas innecesarias. En las mismas se incluye aquella iluminación vertical que se dirige al cielo y que, consecuentemente, no ilumina ninguna zona o área con algún objetivo particular. Este contexto presenta una perspectiva diferente a los demás en el sentido de que en realidad no supone una contaminación para entornos como el astronómico o biológico ya que (estrictamente hablando) la luz emitida hacia el cielo se perdería en el infinito. Otra cuestión será considerar qué parte de esta luz, dirigida hacia el cielo, se refleja en partículas de la atmósfera provocando el resplandor. Para medir este aspecto de la contaminación lumínica las fotografías aéreas o desde satélites son la única posibilidad de medir directamente la emisión o bien habría que recurrir a otros métodos deductivos o predictivos a partir de la emisión. El alumbrado, público y privado, es una de las principales fuentes causantes de esta contaminación. Los aspectos considerados son muy diversos y deben compaginar no sólo la contaminación lumínica sino el equilibrio necesario con los objetivos en principio beneficiosos del alumbrado. Consecuentemente no sólo se requerirá la medición de máximos o valores permitidos sino que también se requiere garantizar niveles mínimos que garanticen el adecuado uso para el que se ha diseñado la instalación.

Además se tendrán diferentes consideraciones como intensidades, direcciones y rangos. En este contexto se requerirán pues instrumentos para medir iluminancias (puntuales y medidas), luminancias, mínimos, máximos, medias, ... En definitiva será interesante poder recurrir al procesado de la información lo que sitúa a la fotografía digital como una técnica muy interesante para su aplicación en este entorno.

- Contexto astronómico. El problema de la contaminación lumínica en este contexto reside en el brillo o resplandor luminoso que se produce en el cielo nocturno. La calidad de la observación nocturna de los objetos celestiales reside en el mayor contraste posible entre el negro del fondo y el brillo de los mismos. En un cielo negro puro se pueden observar los objetos con brillo propio o reflejado. Sin embargo, si el fondo adquiere un brillo propio, el contraste disminuye llegando a imposibilitar o perjudicar la calidad de la visión de estos objetos. Este efecto es apreciable a simple vista y es fácil observar cómo en entornos rurales o alejados de contaminación lumínica se observa un cielo poblado de estrellas y astros que no se aprecian en entornos urbanos o con contaminación lumínica. Cuando los efectos de la contaminación lumínica son muy elevados se puede constatar que apenas son visibles algunos astros. En este contexto la medida del brillo correspondería a un medidor de brillo o luminancímetro. Este instrumento podrá utilizarse en versiones puntuales o integradoras sobre determinados ángulos de apertura según sea el área de interés. El interés del entorno astronómico no reside sólo en la evaluación puntual del brillo del cielo para realizar una medida en un instante dado. Este entorno ha sido uno de los que más ha contribuido en el desarrollo tanto de normativas como de proyectos y de instrumentos para estos fines. En este sentido su ámbito de intereses se extiende también a la valoración de las zonas contaminantes y de su expansión o avance. En este contexto se incluyen también otros parámetros como las longitudes de onda de las emisiones dado que los astros a observar pueden tener determinadas longitudes de onda que no se solapan con las de las emisiones contaminantes y, aunque no resulten visibles al ojo humano, sí lo sean para determinados telescopios o detectores espaciales. Algunos de los instrumentos utilizados para la medición de la contaminación lumínica en entornos astronómicos incluyen filtros y procesamiento de espectros. En un principio teórico, la luz emitida hacia el cielo no debería producir ningún efecto puesto que se perdería en el infinito. El problema de esta luz vertical

radica en su reflejo sobre las partículas presentes en la atmósfera. En el mismo sentido hay estudios que contemplan incluso como más perjudiciales las emisiones horizontales que las verticales. En la misma línea la zonificación podría parecer suficiente para evitar el problema. Sin embargo, la emisión horizontal tiene alcances muy elevados (decenas de kilómetros) y ello provoca que los enemigos del cielo nocturno para una estación astronómica no suelen estar en su posición sino en su contorno. El artículo “La contaminación lumínica de Málaga limita el uso del telescopio de Sierra Nevada” publicado por el diario El País señala cómo el desarrollo urbanístico de la Costa del Sol perjudica la actividad del telescopio de Sierra Nevada más que la propia ciudad de Granada mencionando el caso de las instalaciones de Monte Palomar (USA) que quedaron inutilizadas por el crecimiento de Los Ángeles. (Pérez, 2006)



**Figura 1 Resplandor luminoso nocturno**

- Contexto biológico. El contexto biológico tiene a su vez distintos aspectos a considerar. Por una parte, en el marco animal y vegetal, la contaminación lumínica supone una serie de problemas diferentes que se aprecian a distancia por sus efectos sobre estos entornos. Efectos como la atracción que determinados seres vivos presentan ante la luz, la alteración de ciclos biológicos, la modificación de períodos de luz/oscuridad y tantos otros que han dado lugar, y dan lugar, a múltiples estudios generales y particulares, se hacen patentes en radios circundantes a los focos emisores de contaminación lumínica.

En éste ámbito existen multitud de trabajos relacionados y su número crece sustancialmente en estos tiempos en los que los conceptos de contaminación medioambiental van teniendo cada vez más impacto social y político. Algunos de estos estudios provienen o están relacionados con entornos de especial interés como Doñana o la desembocadura del Ebro, a nivel nacional, así como ya la mayoría de los espacios naturales y reservas naturales.

En este contexto los parámetros de interés a medir se centran en: (Solano Lamphar, San Martín Páramo, & García Gil, Estudio Sobre Contaminación Lumínica en el Parque Natural del Delta del Ebro, 2009)

- Luminancia del fondo de cielo.
- Iluminancia en el terreno.
- Iluminancia en planos verticales.
- Existencia de luminancias puntuales o sectoriales muy elevadas.

Ya que dichos factores pueden afectar a:

- Relación presas-predadores.
- Localización de alimentos.
- Comportamiento reproductivo.
- Desorientación.
- Efecto barrera.

En lo relativo a luminancia del fondo del cielo el instrumental necesario será de la misma índole que para el contexto astronómico. La iluminancia de terreno y de planos verticales requerirá de instrumentos como los utilizados en entornos urbanos para la medida de iluminancias tanto horizontales como verticales (fachadas, ...). La existencia de luminancias puntuales o sectoriales muy elevadas requiere el proceso de la información de todo el área contemplada para la determinación de máximos. En este sentido esta última se postula como idónea para el uso de la fotografía digital que permite el proceso requerido por medios informáticos.

- Contexto urbano.

El contexto urbano se presenta en el marco de la contaminación lumínica, como se hemos mencionado, bajo dos aspectos fundamentales. En el primero de ellos, a diferencia de los anteriores, el contexto urbano se presume como la principal causa y origen de la contaminación lumínica. En dicho sentido la medición de la misma se realiza bajo aspectos regulados (normativas y leyes) cuyo objetivo es limitar y minimizar dicha contaminación. Es de reseñar que estas normativas generalmente se están desarrollando en el marco de otras normativas como los reglamentos de

alumbrados y eficiencias energéticas. En algunos casos se incluyen aspectos relativos a los contextos afectados como el astronómico o el medioambiental, en particular en zonas próximas o relacionadas con dichos contextos.

Los focos de contaminación más reseñables en este contexto son:

- Alumbrado público
- Carreteras
- Complejos deportivos
- Publicidad
- Espacios habitados/viviendas
- Tráfico
- Seguridad
- Fábricas
- Incendios

El segundo aspecto se refiere a los efectos negativos que la contaminación lumínica tiene sobre el propio contexto urbano. Entre los mismos cabe reseñar:

- Efectos sobre la salud humana. (múltiples estudios)
- Efectos sobre la seguridad vial. (deslumbramientos, visibilidad, ...)
- Efectos medio ambientales (fauna y vegetación urbanas)
- Efectos energéticos (despilfarro energético)
- Efectos secundarios (implicación de otras contaminaciones)

Si bien la idea de que el alumbrado público es la principal fuente de contaminación lumínica, cada vez más se hacen patentes otras fuentes contaminantes debido al avance de la sociedad de consumo y sobrepoblación. En este sentido eventos puntuales, que podían aparentar ser de poca relevancia puntual, se multiplican encadenándose en el tiempo y entrando a formar parte de la cotidianidad .



**Figura 2** Cielo de Málaga en Feria a las 02h de la madrugada



**Figura 3 Cémit del cielo de Málaga en Feria a las 02h de la madrugada**

Durante los trabajos realizados en esta tesis se pudieron constatar efectos de la incidencia de estos mencionados “eventos puntuales” como la Feria de Málaga (figuras 2 y 3). Estos eventos, si bien la consideración de “puntuales” puede llevar a la idea de que no son de relevancia, pueden encadenarse, en particular por el avance de las costumbres y hábitos sociales, provocando que su sucesión resulte apreciable y no desdeñable (ferias, Navidad, eventos deportivos, conciertos, parques, publicidad, instalaciones de ocio, ...)



---

## Capítulo 2 - Revisión histórica a través de la normativa. Antecedentes.-

---

### 2.1.- Introducción.

Si bien la historia de la contaminación lumínica es reciente, un camino para realizar un repaso de la misma es el seguimiento de la aparición de las normativas y regulaciones que la contemplan. Gran parte de estas normativas y regulaciones surgen, como de hecho suele ser normal, como consecuencia bien de peticiones o reclamaciones de afectados, bien como reacción de las administraciones a problemáticas concretas. En el primer sentido uno de los entornos que primero plantearon la problemática y provocaron la aparición de las primeras normas y regulaciones fue el entorno astronómico, como hemos mencionado reiteradamente. De hecho, las primeras zonas geográficas que reaccionaron fueron en estos entornos. En el segundo sentido, otra de las principales motivaciones que ha tenido la administración para acometer esta tarea ha sido la crisis energética y económica dado que es evidente que la contaminación lumínica no sólo tiene efectos perjudiciales por sí misma sino que su procedencia energética conlleva el agravamiento de que además de perjudicar tiene un coste elevado, no sólo se perjudica el medio sino que además se paga por ello.

Actualmente, en las sociedades avanzadas, el paralelismo es bastante similar por lo que nuestro planteamiento se centrará en las normativas nacionales dado que nuestro objetivo es plantear una revisión histórica de la que extraer nociones como contextos, parámetros, requisitos legales, etc... que en esta sociedad globalizada rápidamente se extiende entre naciones. Aún en 2013 no existía una regulación internacional homogénea y donde se empezaba a regular presentaba aspectos y puntos de vista diferentes, desde normativas expresas (Eslovenia), pasando por adaptaciones de normativas existentes (UK) hasta simples recomendaciones (USA). (A.L.A.N., 2013) (Morgan\_Taylor, 2013)

## 2.2.- Normativas sobre contaminación lumínica en España.

La evolución histórica de la normativa sobre contaminación lumínica refleja en cierto modo la naturaleza reciente de esta temática. Prácticamente en menos de dos décadas se ha pasado de ser una cuestión menor a adquirir una importancia relevante.

Como ya se ha mencionado en la introducción de este trabajo, en su informe de 2010 de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía (Junta\_de\_Andalucía, Medio ambiente en Andalucía - Informe 2010, 2010) la misma ya refleja cómo la contaminación lumínica, así como la acústica, empieza a ser considerada como un problema social a afrontar.

Los primeros en comenzar a sufrir los efectos de la contaminación lumínica fueron los astrónomos, en particular los observatorios astronómicos, inversiones muy costosas que veían cómo su entorno de trabajo, la calidad del cielo nocturno, empezaba a deteriorarse por los efectos del velo luminoso provocado por el alumbrado nocturno. La elección del emplazamiento de un observatorio astronómico conlleva la necesidad de un entorno de pureza de la calidad del cielo nocturno llegando a ser éste un criterio decisivo para ello. En este sentido los Observatorios del Instituto de Astrofísica de Canarias tenían un emplazamiento idóneo para su actividad. El crecimiento de la población y desarrollo de actividades, entre otras el turismo, en las islas contribuyeron negativamente al empeoramiento de esta calidad del cielo nocturno llegando a poner en peligro la propia continuidad de las actividades. En consecuencia ya en 1988 se promulga la Ley 31/1988 de 31 de octubre, sobre Protección de la Calidad Astronómica de los Observatorios del Instituto de Astrofísica de Canarias, que se desarrolla cuatro años más tarde con la aprobación del Reglamento que la desarrolla.

A la problemática de los astrónomos se van sumando posteriormente más entornos afectados. Estudios sobre la afección de entornos medioambientales, flora y fauna, e incluso sobre la salud humana, van provocando una sensibilidad social que reclama así mismo la atención de los organismos reguladores.

Finalmente, otra motivación, sin duda de relevancia, que se suma a la conciencia medioambiental es el coste energético que se derrocha no sólo sin objeto o fin útil sino que, además, se hace provocando perjuicios en diversos entornos como lo es la contaminación lumínica. No se puede olvidar que uno de los principales orígenes de esta contaminación es el

---

alumbrado público cuyo coste energético y económico es muy elevado. En tiempos de crisis económica las medidas orientadas al ahorro son sin duda una motivación para el regulador.

En estos sentidos se puede observar que la normativa que se ha ido desarrollando referida a la contaminación lumínica tiene dos nexos relevantes, uno el contexto astronómico y, el otro, los contextos de ahorro y eficiencia energética.

Las tablas 1 y 2 reflejan una evolución histórica de normativas autonómicas y nacionales relacionadas con la contaminación lumínica. Si bien se observa un inicio en el año 1988, se puede así mismo ver cómo hasta mediados de la década del 2010 no se produce una apreciable extensión de las regulaciones. Estas fechas coinciden con el comienzo de nuestro trabajo lo que ha sido una de las motivaciones del mismo a la vez que ha supuesto navegar en paralelo con otros grupos de trabajo y una continua aparición de novedades y cambios.

Aún así podemos mencionar, como ejemplo del momento de cambios que se están produciendo recientemente en lo referente a la contaminación lumínica, la aparición, prácticamente finalizada la elaboración de esta tesis, del “DECRETO 190/2015, de 25 de agosto, de desarrollo de la Ley 6/2001, de 31 de mayo, de ordenación ambiental del alumbrado para la protección del medio nocturno” de la Generalitat de Catalunya. (Generalitat\_de\_Catalunya, DECRETO 190/2015, de 25 de agosto, de desarrollo de la Ley 6/2001, de 31 de mayo, de ordenación ambiental del alumbrado para la protección del medio nocturno, 2015) . En su momento el “DECRETO 82/2005, de 3 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento de desarrollo de la Ley 6/2001, de 31 de mayo, de ordenación ambiental del alumbrado para la protección del medio nocturno” (Generalitat\_de\_Catalunya, 2005) ya contemplaba este desarrollo.

En todo caso cabe utilizar esta circunstancia como ejemplo del problema que supone la regulación normativa por parte de las administraciones en cuanto a que una Ley dictada en 2001 se desarrolle catorce años después, cuando con toda probabilidad, las tecnologías y condiciones han sufrido importantes cambios. No es este un caso aislado sino que, como se puede observar en las tablas siguientes, se produce, con mayor o menor incidencia, en todos los casos.

Origen	Ley	Desarrollo
Islas Canarias	Ley 31/1988 de 31 de octubre, sobre Protección de la Calidad Astronómica de los Observatorios del Instituto de Astrofísica de Canarias	Real Decreto 243/1992, de 13 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento de la Ley 31/1988, de 31 de octubre, sobre protección de la calidad astronómica de los Observatorios del Instituto de Astrofísica de Canarias
Cataluña	Ley 6/2001, de 31 de mayo, de ordenación ambiental del alumbrado para la protección del medio nocturno	Decreto 82/2005, de 3 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento de desarrollo de la Ley 6/2001, de 31 de mayo, de ordenación ambiental del alumbrado para la protección del medio nocturno
Islas Baleares	Ley 3/2005, de 20 de abril, de protección del medio nocturno de las Illes Balears(1)	(1) El desarrollo corresponde a los Consejos Insulares.
Navarra	Ley Foral 10/2005, de 9 de noviembre, de ordenación del alumbrado para la protección del medio nocturno	Decreto Foral 199/2007, de 17 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento de desarrollo de la Ley Foral 10/2005, de 9 de noviembre, de ordenación del alumbrado para la protección del medio nocturno
Cantabria	Ley de Cantabria 6/2006, de 9 de junio, de prevención de la contaminación lumínica	
Andalucía	Ley 7/2007, de 9 de julio, de gestión integrada de la calidad ambiental (Sección 3ª, Capítulo II, Título IV)	Decreto 357/2010, de 3 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento para la Protección de la Calidad del Cielo Nocturno frente a la contaminación lumínica y el establecimiento de medidas de ahorro y eficiencia energética
España	Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera	
España	Ley 21/1992, de 16 de julio, de Industria.	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

Tabla 1 Evolución normativas en España

Ley	Canarias				Cataluña		Baleares Navarra	Cantabria	Andalucía			
<b>Año</b>	<b>1988</b>	<b>...</b>	<b>1992</b>	<b>...</b>	<b>2001</b>	<b>...</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>...</b>	<b>2010</b>
<b>Desarrollo</b>			Canarias				Cataluña		Navarra	España (*)		Andalucía

(\*) 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

**Tabla 2 Línea del tiempo desarrollo normativas en España**

Los primeros pasos del desarrollo de la normativa relativa a contaminación lumínica surgen del entorno astronómico con la “LEY 31/1988, de 31 de octubre, sobre protección de la calidad astronómica de los observatorios del Instituto de Astrofísica de Canarias” que se desarrolla cuatro años más tarde con el “REAL DECRETO 243/1992, de 13 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento de la Ley 31/1988, de 31 de octubre, sobre protección de la calidad astronómica de los Observatorios del Instituto de Astrofísica de Canarias”.

En 2001 en Cataluña se promulga la “Ley 6/2001, de 31 de mayo, de Ordenación Ambiental del Alumbrado para la Protección del Medio Nocturno” que se desarrolla en 2005 con el “Decreto 82/2005, de 3 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento de desarrollo de la Ley 6/2001, de 31 de mayo, de ordenación ambiental del alumbrado para la protección del medio nocturno”.

También en 2005 se suman Navarra con la “Ley Foral 10/2005, de 9 de noviembre, de ordenación del alumbrado para la protección del medio nocturno” y las Islas Baleares con la “Ley 3/2005, de 20 de abril, de protección del medio nocturno de las Illes Balears”.

En 2006 se incorpora en esta línea la Comunidad de Cantabria con la “Ley de Cantabria 6/2006, de 9 de junio, de prevención de la contaminación lumínica” y en 2007 lo hace la Comunidad de Andalucía con la “Ley 7/2007, de 9 de julio, de gestión integrada de la calidad ambiental” que contempla la contaminación lumínica en la Sección 3ª, Capítulo II, Título IV y que desarrolla en 2010 con el Decreto 357/2010, de 3 de agosto, por el que se aprueba el “Reglamento para la Protección de la Calidad del Cielo Nocturno frente a la contaminación lumínica y el establecimiento de medidas de ahorro y eficiencia energética.”

Las Comunidades Autónomas Valenciana, del País Vasco y de la Región de Murcia también están desarrollando normativa al respecto.

A nivel nacional en 2008 se promulga el “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”. Estas instrucciones técnicas complementarias refieren ya instrumentos y metodologías para realizar mediciones y evaluaciones.

Al margen de estas leyes y decretos también se han publicado recomendaciones y guías técnicas como el “Protocolo de auditoría energética de las instalaciones de alumbrado público exterior (octubre 2008)” del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio en colaboración con el Comité Español de Iluminación o la “Guía técnica de adaptación de las instalaciones de alumbrado exterior al decreto 357/2010, de 3 de agosto” editada por la Junta de Andalucía en 2011.

Como se indica al comienzo de esta memoria, cabe reseñar que esta guía técnica de la Junta de Andalucía menciona en 2011 el uso de la fotografía digital como una alternativa aún “compleja y costosa”: *“La fotografía digital apunta como la nueva metodología de medición lumínica. Se aplica ya en casos específicos... , pero los equipos y procesos son aún muy complejos y costosos. Se trabaja ya en el desarrollo de equipos y metodologías aplicables a la gestión práctica de instalaciones”*.

En esta línea se enmarca esta tesis con el estudio y análisis de instrumentos para la medición de la contaminación lumínica en entornos urbanos y la propuesta del uso de cámaras fotográficas digitales comerciales con este fin. Aprovechando el avance tecnológico de estas cámaras se pretende la introducción de las cámaras comerciales para tal fin con objeto de contribuir a la bajada del coste así como aportar otras mejoras frente a los instrumentos utilizados o propuestos por las normativas actuales.

Se puede afirmar que las dos principales motivaciones de estas normas se fundamentan en la demanda del entorno astronómico y, en particular recientemente, la regulación del ahorro y eficiencia energética.

En lo que concierne a nuestro trabajo, desde el punto de vista astronómico, el objetivo de la normativa se orienta hacia la protección de la pureza del cielo nocturno. La instrumentación requerida está orientada por una parte a la evaluación de la calidad del cielo y, por otra, al seguimiento del desarrollo de la contaminación lumínica. En el primer caso los instrumentos perseguirán la medición del brillo del cielo en la noche y el estudio de sus orígenes y fuentes (Luminancímetros, SQM, espectrofotómetros, fotografía all-sky, Astmon,...). En el segundo caso se buscará el estudio de mapas de contaminación y evolución de ésta (mapas de contaminación, mapas de evolución, programas DMSP-OLS, campañas Globe at night, Greenlight, ...). En el caso energético la instrumentación perseguirá fundamentalmente la medición de los parámetros lumínicos y los márgenes establecidos por la normativa en las instalaciones de alumbrado (luminancímetros, luminancímetros integradores, luxómetros, fotografía digital, ...). Por su parte otros entornos como el biológico tienen similitudes con el entorno astronómico buscando la evaluación de la calidad del cielo nocturno en particular en áreas específicas (Parque de Doñana, desembocadura del Ebro, ...). En lo particular, el entorno biológico se ve también afectado colateralmente por la contaminación lumínica en los efectos que esta deriva a la contaminación atmosférica y del medio ambiente dado que, como ya hemos dicho, la contaminación lumínica no sólo tiene efectos directos propios sino que además, por su origen energético, provoca así mismo contaminación atmosférica.



Figura 4 Línea del tiempo de Leyes de rango autonómico.



Figura 5 Línea del tiempo del desarrollo reglamentario de las leyes de rango autonómico.



---

# Capítulo 3.- Estado del arte de la instrumentación para la medición de la contaminación lumínica.-

---

## 3.1.- Introducción.

Los diferentes aspectos, efectos y entornos a considerar en la contaminación lumínica conllevan diferencias en su medición. Por otra parte, la historia reciente, y corta, de este tipo de contaminación hace que existan estudios y propuestas también recientes y muchas de ellas en curso. Algunos de estos estudios y propuestas están estrechamente ligados a entornos o contextos determinados (astronomía, medio ambiente, ...).

En este capítulo se expone una relación del resultado del estudio del estado del arte de la instrumentación relacionada con la medición de la contaminación lumínica. Esta selección se ha realizado contextualizándola con los entornos donde se han localizado preferentemente, con independencia de que algunos de ellos sean comunes o utilizados en diferentes contextos.

Cabe reseñar que durante los años en que se ha realizado esta tesis se han ido produciendo cambios y novedades en la aparición de nuevos instrumentos o propuestas fruto de la consideración reciente que está teniendo la contaminación lumínica y de la aparición de grupos de trabajo y trabajos relacionados.

Los principales contextos bajo los que se interpreta la contaminación lumínica van en ocasiones acompañados de diferentes métodos de medición, a veces debidos a diferentes parámetros de interés, a veces debidos a las diferencias propias de estos contextos. Esta situación no es óbice para que determinados métodos sean compartidos.

Este capítulo se ha estructurado así en función de los principales entornos afectados por la contaminación lumínica, con independencia de que algunos de los sistemas de medición y evaluación de ésta puedan ser comunes.

### 3.2.- El contexto astronómico, herramientas de evaluación.

La contaminación lumínica es un problema grave en el contexto astronómico. Ésta provoca un halo o velo luminoso en el cielo nocturno que merma el contraste con el que se visualizan los astros y demás elementos interestelares de interés para los astrónomos.

En este entorno existen dos conjuntos de usuarios afectados. De una parte los observatorios de relevancia nacional e internacional que cuentan con el apoyo de la normativa y legislación incipiente. Bajo este punto de vista esta regulación suele contemplar la zonificación que protege los entornos cercanos a los mismos. Por otra parte están los usuarios, aficionados y/o profesionales, que practican la astronomía desde diversos enclaves domésticos o naturales. Es evidente que estos últimos no pueden contar con una regulación que les garantice la pureza del cielo nocturno en cualquier entorno. Este hecho se debe fundamentalmente a que la iluminación artificial nocturna no obedece a razones arbitrarias o caprichosas sino que se debe a multitud de necesidades inherentes a la actividad humana (alumbrado público, seguridad vial, seguridad ciudadana,...).

El entorno astronómico ha sido uno de los precursores de la lucha contra la contaminación lumínica así como de la realización de estudios y trabajos acerca de la misma. Los principales grupos de trabajo y organizaciones relacionados con la contaminación lumínica se enmarcan en este contexto.

Si bien el objetivo común es el mismo, el entorno astronómico tiene unas características que en algunos aspectos le diferencian de otros entornos afectados por la contaminación lumínica. En este sentido aspectos como los espectros de frecuencias y la afección de cuestiones climatológicas y ambientales dan lugar a instrumentación y estudios en cierto modo particulares. Conceptos como la extinción atmosférica, brillo del cielo, utilización de filtros según distintas bandas y otros dotan de características propias a la instrumentación utilizada en este contexto, con independencia de aspectos comunes.

Los entornos astronómicos utilizan principalmente dos herramientas para la evaluación y seguimiento de la contaminación lumínica: Los mapas de contaminación lumínica y los instrumentos de medida de la luminosidad del cielo.

### 3.2.1.- Los mapas de contaminación lumínica.

Estos mapas permiten, por una parte, la localización de los lugares geográficos de mayor idoneidad para la práctica de la astronomía, tanto desde el punto de vista de enclave o ubicación de los centros observatorios como de las zonas de mejor visibilidad para la práctica de esta actividad. Por otra parte, el estudio de estos mapas y su evolución en el tiempo permite la predicción y/o adopción, en su caso, de medidas correctoras y/o preventivas.



Figura 6 Mapa mundial de contaminación lumínica (Fuente NASA)

La realización de un mapa de contaminación lumínica, al margen de los inconvenientes que contemplen las tecnologías utilizadas, cuenta con problemáticas añadidas. Entre éstas se pueden citar condicionantes ambientales (nubosidad, otras contaminaciones, horarios, fase lunar...), condicionantes temporales (misma fecha o proximidades, errores de medida (no siempre se efectúa la misma con el mismo instrumento ó método), ...) y, en general, mismas condiciones de contexto. Una misma fuente y condiciones de contaminación lumínica pueden tener distinta medida según se presenten, por ejemplo, en un Londres nublado o en un desierto sin nubes.

Una característica importante de la contaminación lumínica, bajo el contexto astronómico, radica en la posibilidad de utilizar distintos espectros de longitudes de onda. Bajo este principio, las diferencias de determinados espectros de las radiaciones procedentes de planetas y elementos estelares con los espectros procedentes del alumbrado público permite la utilización de filtros como herramientas para mejorar el contraste buscado. En este

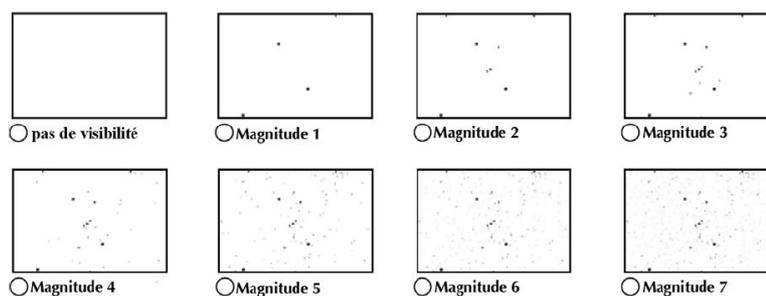
---

sentido las normativas empiezan a contemplar los espectros luminosos del alumbrado en determinadas zonas.

La elaboración de los mapas se realiza con distintas técnicas:

- La primera, con origen básicamente en el entorno astronómico, consiste en la cuantificación de la mera apreciación visual del número de estrellas en áreas preconocidas del cielo. A partir de unos patrones y zonas delimitadas en cuyo interior se conoce el número de estrellas visibles en condiciones idóneas se hace un muestreo en las zonas o áreas en las que se desea realizar el mapa y se obtienen los mapas lumínicos respectivos. Actualmente la vía más habitual para la obtención de estos datos es la de la web o internet. En este campo se solicita la participación ciudadana a través de páginas web suministrándoles unos patrones y solicitándoles la devolución de los mismos particularizados a su lugar de observación y la identificación de éste. Resulta evidente que el punto débil de este método radica en la dependencia de la validez de los datos tanto de la propia apreciación subjetiva de los participantes (agudeza visual, causas ajenas a la contaminación lumínica, nubosidad, ...) como de la propia buena intención del sujeto. Este inconveniente se minora considerando, gracias a la extensión de la web, el elevado número de participantes que permite absorber y mediar los datos obtenidos.

Este sistema ha sido utilizado en el programa “Globe at Night”, que se lanza anualmente recabando la información de miles de personas. Para ello la campaña, lanzada internacionalmente a través de internet, incluye una información al usuario de los datos a recabar y método a seguir así como de un formulario que incluye, además de los patrones a comparar, otros datos necesarios como lugar, horario, condiciones climáticas, etc... En el programa de 2009 se alcanzaron 15.300 observaciones durante dos semanas. La siguiente figura muestra un ejemplo de los patrones suministrados:



**Figura 7 Patrones de visibilidad de Orion según escala en magnitud. (Fuente [www.globe.gov](http://www.globe.gov))**

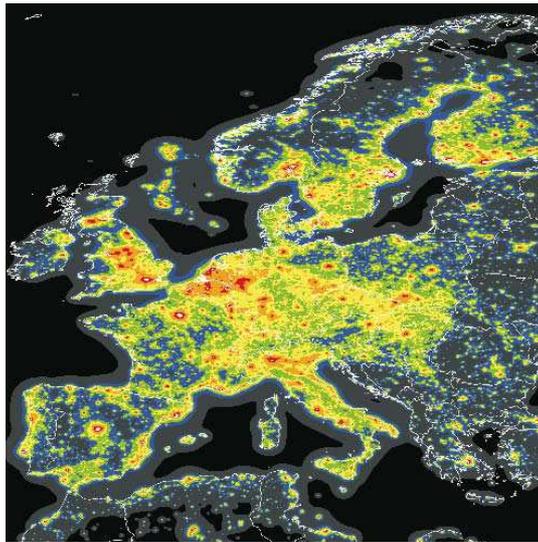
Un método muy utilizado para la confección de estos mapas consiste en trazar, sobre el mapa original de fondo negro, marcas de colores, a modo de cuantificación de la contaminación puntual lo que permite marcar las zonas de mayor a menor contaminación lumínica, de modo similar a la termofotografía u otros mapas cuantificadores. Una de las escalas utilizadas con este fin es la escala Bortle, creada por John Bortle en 2001. Esta escala establece valores entre 1 y 9, desde el negro al blanco en función de la magnitud de estrellas visibles a simple vista. (Figura 8)

Color	Bortle* Class
Black	1
Dark Grey	2
Blue	3
Green	4
Yellow	4.5
Orange	5
Red	6.7
White	8.9

- 1 - Cielo oscuro excelente
- 2 - Cielo oscuro verdadero típico
- 3 - Cielo rural oscuro
- 4 - Cielo rural
- 4.5 - Transición cielo rural/suburbano
- 5 - Cielo suburbano
- 6 y 7 - Cielo suburbano brillante y Transición cielo suburbano/urbano.
- 8 y 9 - Cielo urbano y Cielo urbano central

**Figura 8 Escala de Bortle (Fuente Observatorio Arval)**

La observación de estos mapas permite una evaluación visual geográfica de la contaminación lumínica. Claramente se distinguen las zonas más contaminantes como las más pobladas y desarrolladas tecnológica y económicamente.



**Figura 9 Mapa de contaminación lumínica de Europa. (Fuente Cinzano)**

- La segunda técnica para la realización de estos mapas, también basada en la obtención popular de información, se diferencia de la anterior en que dichos datos, en lugar de obtenerse de la apreciación visual del sujeto, se obtienen mediante la medición utilizando un instrumento. El instrumento más utilizado en los casos más significativos es el SQM (Sky Quality Meter) que es un “medidor de la calidad del cielo” de bajo coste (del orden de 120 dólares). La medición la realiza en “Magnitudes per Square Arc Second”, medida utilizada en astronomía para evaluar el brillo del cielo. Esta medida se puede trasladar a  $cd/m^2$  mediante la fórmula:

$$cd / m^2 = 10.8 \times 10^4 \times 10^{(-0.4[mag / arc \text{ sec}^2])}$$

Este instrumento existe en diferentes versiones (SQM y SQM-L), diferenciándose el segundo en disponer de una lente que permite obtener una mayor cantidad de luz para un menor ángulo de visión, recomendado para entornos urbanos donde pueden existir más distorsiones laterales. La medida que realiza es dependiente de la temperatura por lo que incorpora un sensor de temperatura al objeto de asociar cada medida y la temperatura a la que se realiza.

Estos mapas gozan de mayor precisión que los primeros, al no depender de la subjetividad del observador, sin embargo la necesidad de adquirir el instrumento reduce la cantidad de observadores en disposición de participar en el muestreo. En

contrapartida, el hecho de disponer del instrumento dota al participante de un grado, si no necesariamente de profesionalidad, sí de implicación en el contexto.

El SQM ha añadido una alternativa al programa “GLOBE at Night” que, sin descartar el método anterior, añade en su ficha de encuesta la posibilidad de incorporar los datos obtenidos con el SQM. (Figura 10)

**Figura 10** Ficha disponible en el programa GLOBE AT NIGHT con SQM

- Una tercera técnica utilizada, de mayor nivel tecnológico, consiste en la utilización de satélites para la obtención de información. Determinados satélites disponen de sensores de radiaciones, entre ellas en el rango visible, que permiten la obtención de bases de datos y la elaboración de mapas de contaminación lumínica.

“The first World Atlas of the artificial night sky brightness” (El primer atlas mundial del brillo artificial nocturno del cielo) de Cinzano es actualmente una referencia a nivel mundial que no puede faltar en ningún trabajo relativo a la contaminación lumínica (Cinzano, 2001). Actualmente ya se está preparando el segundo atlas mundial por el mismo autor.

Este método también es el anunciado por la Junta de Andalucía para la elaboración de mapas lumínicos de Andalucía.

Este método presenta una gran diferencia con los anteriores. Los primeros evalúan el efecto de la emisión luminosa sobre el brillo del cielo y consecuentemente sobre la visibilidad de los astros. Este método sin embargo observa directamente la emisión luminosa hacia el cielo, no sus efectos. En este sentido este sistema se utiliza también en otros contextos como la observación de la evolución de la expansión de las zonas civilizadas (asociadas a la emisión de luz artificial). Las bases de datos de estos programas incluyen el seguimiento de décadas lo que permite realizar mapas de crecimiento.

El sistema por satélites cuenta con algunos inconvenientes. Entre ellos cabe destacar que su medida responde prácticamente sólo a la componente vertical de la radiación (dada la distancia al punto de medida). Por otra parte también intervienen factores que diversifican las condiciones de la medición en áreas tan extensas (diferencias climatológicas, horarias, otras contaminaciones, humedad, ...). Expertos en esta materia ya relevan este inconveniente (Galadí Enriquez, 2008):

*Los resultados que se obtienen de este modo tienen la ventaja de que abarcan áreas de territorio extensísimas, pero su traducción en términos de magnitud estelar límite observable, brillo del fondo de cielo en mag/arcsec<sup>2</sup> en varias bandas ,etcétera, es en buena medida incierto y depende de manera crucial de los modelos atmosféricos, las condiciones meteorológicas locales y, sobre todo, de la calibración a través de medidas directas reales por los métodos tradicionales de la fotometría astronómica.*

Tanto el Atlas de Cinzano como el proyecto de la Junta de Andalucía utilizan el OLS (Operational Linescan System) del programa DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) del Departamento de Defensa de Estados Unidos. Este programa se inició a mediados de los años 60 con el objetivo de obtener datos sobre la cobertura mundial de nubes. El sistema fue oficialmente reconocido y desclasificado en 1972 y fue habilitado para uso civil y para la comunidad científica (NASA, 1997). Desde entonces ha sido varias veces mejorado. La última serie (Block-5D) incorpora el OLS (Operational Linescan System). El sensor OLS tiene dos sensores de banda ancha, uno en la banda visible/cercana-infrarroja y otra en la banda térmica infrarroja. Captura imágenes con una resolución nominal de 0,56km.

Pese a su apariencia de idoneidad y resultados espectaculares, este método presenta inconvenientes, especialmente si se desea hacer un uso preciso del mismo, resultando más idóneo para estudios de grandes áreas y apreciaciones generales. Entre estos inconvenientes cabe destacar problemas con la resolución del sensor (2,7Km) mejorada a 1Km por el DMSP-OLS, problemas resultantes de la amplia superficie abarcada por un pixel que puede provocar que mismas fuentes sean captadas por más de uno, errores al trasladar mediante cálculos la medida a un mapa y errores asociados al grado de humedad ambiental y sus diferencias en áreas tan grandes. Todo ello unido a las diferencias temporales entre las medidas. (Doll, 2008)

En general también se pueden elaborar los mapas a partir de cualquiera de los métodos de medición desde el suelo mediante distintos instrumentos. Estos métodos, que requieren una medición punto a punto, bien de tramas, bien de recorridos, de la zona a mapear, suelen utilizarse en zonas más reducidas (estudios urbanos, municipales, zonas ecológicas (como el estudio del Delta del Ebro mencionado más adelante), ...

### **3.2.2.- Los instrumentos de medida de la luminosidad del cielo.**

Los mapas mencionados son de gran utilidad en el contexto astronómico a la hora de evaluar emplazamientos de puntos o centros de observación. Sin embargo los efectos de la contaminación lumínica no son constantes y varían según multitud de parámetros que habitualmente empeoran sus efectos. Desde efectos naturales como la luminosidad de la luna según su fase, la presencia de nubes o la propia humedad ambiental hasta efectos de otras contaminaciones (CO<sub>2</sub>, humo, partículas, ...) provocan que los efectos de la contaminación lumínica sobre la pureza visual de cielo varíen notablemente. En este sentido el observador astrónomo requiere realizar mediciones antes o durante una observación. Esta medida también se utiliza en alguno de los métodos de trazado de mapas de contaminación lumínica mencionado anteriormente.

La medida de la cantidad de luz (bajo cualquiera de los parámetros conocidos (brillo, luminosidad, luminancia, ...) se puede realizar con los instrumentos clásicos (fotómetros, luminancímetros, iluminancímetros, ...) existentes, en amplia oferta, en el mercado. Sin embargo, bajo el contexto astronómico, estos instrumentos deben contemplar particularidades específicas, no siempre contempladas en los instrumentos generales del mercado, más

orientados a la medición de la luz ambiental (iluminación, alumbrado, fotografía, ...). Entre estas particularidades cabe destacar las bajas escalas requeridas (el brillo nocturno del cielo puede ser mínimo (idealmente, para el astrónomo, debería ser nulo) y, consecuentemente, los tiempos de exposición o velocidad de respuesta. Así mismo se pueden requerir filtros que permitan evaluar distintos espectros de longitudes de onda, lentes para minimizar efectos colaterales, ...

Por esta razón existen instrumentos particularizados para la medida de contaminación lumínica en el contexto astronómico, sin que por ello no puedan ser de utilidad en otros contextos.

Para la evaluación de la calidad lumínica del cielo en este contexto se pueden destacar, actualmente, los siguientes instrumentos:

### 3.2.2.1.- Sky Quality Meter.

El SQM es un instrumento que se ha popularizado en el entorno astronómico de la contaminación lumínica.



Figura 11 SQM Medidor de Calidad del Cielo

La razón fundamental de esta popularización es su razonable relación calidad-prestaciones/coste.

Fabricado por la casa Unihedron, se presenta como un medidor portátil de brillo del cielo para astrónomos y de precio asequible. El medidor utiliza un sensor convertidor luz-frecuencia (TAOS TSL237) con un filtro Hoya CM filter que filtra las radiaciones infrarrojas. El instrumento tiene un ángulo sólido efectivo de 1.532 esteroradianes, es decir que acepta la luz desde un cono de unos 80 grados en el cielo. Así mismo dispone de compensación de temperatura de la dependencia del sensor con ésta. Su precisión se encuentra sobre  $\pm 10\%$  ( $\pm 0.10 \text{ mag/arcsec}^2$ ).

La medida se realiza en “magnitudes” por arco segundo cuadrado. El término “magnitud” por arco segundo cuadrado significa que el brillo en magnitudes es el reflejado por un arcosegundo cuadrado del cielo. Una lectura de 20.00 indica la equivalencia con una visibilidad estelar de magnitud 20 se consigue en un arcosegundo cuadrado del cielo.

La lectura puede convertirse directamente en candelas por metro cuadrado por la ecuación ya mencionada:

$$cd / m^2 = 10.8 \times 10^4 \times 10^{(-0.4[mag / arc \text{ sec}^2])}$$

Esta medida en  $Cd/m^2$  nos permitiría considerar el SQM como un luminómetro adaptado a la medida del brillo del cielo con fines astronómicos.

El SQM ha sido probado y caracterizado por Pierantonio Cinzano en el “Light Pollution Science and Technology Institute (ISTIL/LPLAB) (Cinzano, 2005). El instrumento fue analizado con fotometría y mediciones de laboratorio en una comparativa con los principales sistemas utilizados en estudios de contaminación lumínica. En conclusión, el instrumento se definió con “preciso e interesante” y de utilidad para cuantificar la polución lumínica con facilidad y precisión.

El SQM existe también en versión SQM-L que incorpora una lente. De este modo se recibe más luz desde un cono más pequeño minimizando la interferencia de otras luces y sombras del horizonte. Recientemente ha salido versiones del SQM-L con conexión para USB (SQM-LU), para Ethernet o para RS-232 permitiendo la monitorización mediante PC o unidad de control.

Para este trabajo se ha adquirido un SQM-LU con conexión para USB con objeto de realizar mediciones y pruebas utilizando este instrumento reconocido en el contexto astronómico y validado por entidades reconocidas.

Bajo nuestra opinión, el SQM es un instrumento idóneo para el contexto astronómico mencionado pero con ciertas restricciones. En nuestro estudio sobre instrumentación para la evaluación de la contaminación lumínica y en otros estudios, incluso del contexto

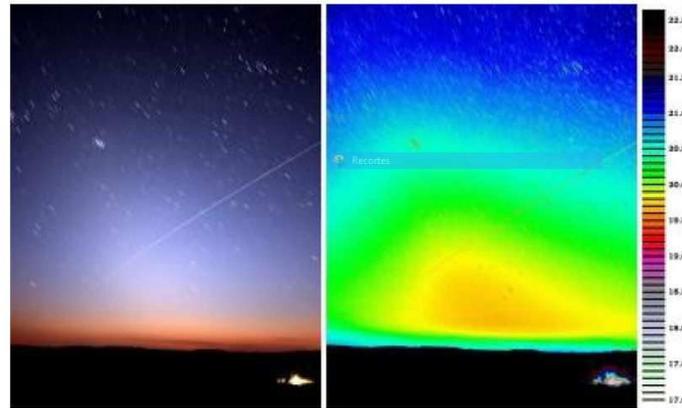
astronómico, en determinados casos se realiza una evaluación de la bóveda celeste, fundamentalmente con la fotografía ojo de pez, y el SQM no resulta útil e incluso puede resultar erróneo para este caso. El motivo fundamental es que dicho instrumento abarca un cono que integra un área y no dispone de elemento de visualización del campo abarcado o para apuntar. Debido a ello si se utilizara en zonas próximas al horizonte, integraría las zonas terrestres con lo que acabaría falseando la media real de la luminosidad del cielo en dicho horizonte. Por esta razón, la utilización de este instrumento se especifica sólo para la medida vertical hacia el cénit del cielo. En este sentido no debe utilizarse el mismo en estudios que no se refieran a esta vertical.

### 3.2.2.2.- Cámaras fotográfica CCD o CMOS.

Otro sistema utilizado para la medición del brillo nocturno es la utilización de cámaras fotográficas con sensores CCD o CMOS. Las cámaras utilizadas pueden ser profesionales, de alto coste, ó incluso más comerciales, de menor coste, siendo una diferencia importante la superficie del sensor y otras características como utilización de filtros. Si bien el uso de cámaras específicas sí se encuentra desarrollado e incluso existe oferta comercial al respecto, el uso de cámaras DSLR y su calibración se encuentra aún en estudios y propuestas entre las que se encuentra parte de esta tesis. El aspecto fotográfico y no de instrumento de medida, las marcas comerciales y la búsqueda de prestaciones fotográficas hacen que la traslación a un uso como instrumento de medida no esté aún consensuada y dependa de múltiples factores.

Con cámaras fotográficas digitales se pueden utilizar, básicamente, dos métodos para la evaluación del brillo nocturno. Uno consiste en la conversión de la fotografía en una nueva fotografía donde se sustituyen los elementos de una trama por colores que reflejen una escala de luminosidad. Otro método consiste en captar una determinada zona conocida del mapa estelar y contar el número de estrellas visibles en la misma.

En el primer caso la medición se puede hacer mediante un proceso por software que analice la imagen captada y obtenga una “imagen falsa de colores” (Kolláth, 2009) consistente en realizar un tratamiento por programa de la imagen y convertirla en una nueva imagen a modo de mapa de colores en función de la luminosidad. La precisión obtenida puede llegar al 10%.



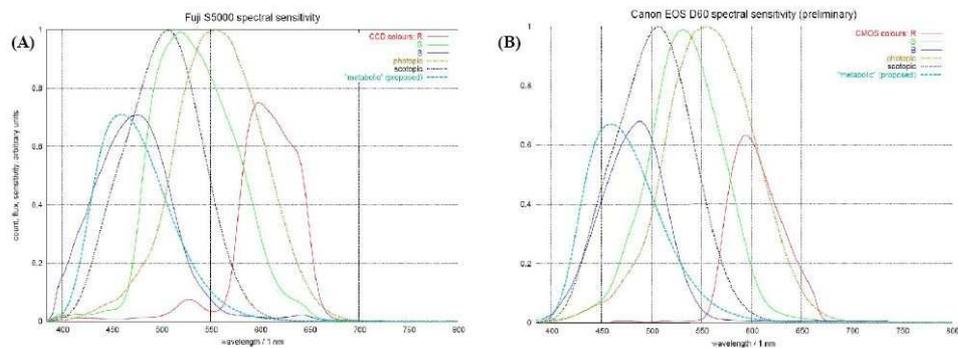
*Zodiacal light photographed in the Zselic Landscape Protection Area (left) and the luminance on a false colour image (right). The diagonal line is the trail of ISS.*

**Figura 12 Imagen obtenida con cámara comercial y su conversión en escala de colores. (Fuente Zoltán Kolláth (Using Digital SLR camera to monitor light pollution))**

El segundo método, propuesto por Fabio Falchi y Pierantonio Cinzano en su artículo “CCD measurement of night sky brightness”, (Falchi & Cinzano) consiste en obtener una fotografía de una zona conocida y previamente localizada del mapa estelar y proceder a la cuenta de estrellas reflejadas en la misma. Para ello se utiliza un telescopio, filtros adecuados y un programa o documentación tipo planetario estelar así como un procedimiento como el propuesto por Falchi. Este procedimiento incluye la metodología y condiciones a seguir. El artículo pertenece a un proyecto de la IDA (International Dark-Sky Association) para obtener datos sobre contaminación lumínica y extinción atmosférica. En este proyecto se propone la participación de astrónomos avanzados amateurs para colaborar en la obtención de un elevado número de muestras. El proyecto se propuso en Italia como parte de la sección italiana de la IDA.

Estos métodos requieren algunas correcciones y consideraciones, entre otros, por el tiempo de exposición requerido. Así, fotografiar las estrellas con la pretensión de obtener la mayor cantidad visible requiere tiempos de exposición elevados para la sensibilidad de las cámaras. En este sentido se pueden, entre otros, provocar problemas de sobreexposición (saturación de píxeles) y de trazas por la rotación de la tierra. En la Figura 12 se puede observar la trayectoria de un cometa (línea oblícua). Así mismo, con objeto de mejorar la precisión, y debido a la dependencia de los sensores con la temperatura, se puede incluir una compensación de temperatura como propone Dan M. Duriscoe en su artículo “Measuring Night-Sky Brightness with a Wide-Field CCD Camera”. (Duriscoe, Luginbuhl, & Moore, Measuring Night-Sky Brightness with a Wide-Field CCD Camera, 2007)

Cuando se requiera un estudio multispectral se hace necesario una caracterización de la respuesta espectral de la cámara. La Figura 13, (Teikari, 2007) (Hollan, 2004) presenta las respuestas de una cámara CCD y otra CMOS comerciales:



**Figura 13 Comparativa de la respuesta espectral entre cámaras comerciales CCD y CMOS (Fuente Teikari 2007 / Hollan 2004)**

La utilización de cámaras digitales permite el tratamiento de la imagen mediante proceso software al disponer de la imagen como un mapa de píxeles transferibles a un ordenador y procesable en el mismo.

En estas fechas empiezan ya a desarrollarse y obtenerse resultados por grupos de trabajo, tanto extranjeros como nacionales. Aparecen ya tesis que han servido de documentación y estudio para este trabajo como la tesis “Diseño de dispositivos de control y medición de contaminación lumínica en aplicaciones en la ingeniería civil y astronomía.”, realizada por D. Ovidio Rabaza Castillo y dirigida por los doctores D. Antonio Espín Estrella, D. David Galadí-Enríquez y D. Fernando Aznar Dols en Granada, 24 de junio de 2010, la tesis “Aplicaciones luminotécnicas de cámaras digitales” realizada por D. Carlos Sierra Garriga y dirigida por el doctor D. Ramón San Martín Páramo, Barcelona, 2002 o la tesis “The Usage of Digital Cameras as Luminance Meters” realizada por Helke Gabele y dirigida por los doctores D. Gregor Fischer y D. Dietmar Wüller en Colonia (Alemania) en 2006, por citar algunos ejemplos relevantes.

### 3.2.2.3.- Espectrofotómetro.

En su artículo “A portable spectrophotometer for light pollution measurements”, Pierantonio Cinzano presenta un espectrofotómetro portátil para la monitorización del brillo del cielo y las emisiones de polución lumínica en el rango de 420 nm a 950 nm. (Cinzano, 2004)

Éste permite la elaboración de mapas espectrales nocturnos del cielo en lugares y a través de territorios con formato compacto, transportabilidad y cobertura automática de una trama de puntos.



**Figura 14** El espectrofotómetro WASBAM-SSH (Fuente Cinzano).



**Figura 15** El espectrofotómetro SAND (Fuente Aubé)

Existen otros espectrofotómetros diseñados por otros investigadores en el contexto de la polución lumínica. En su artículo “Light Pollution modeling and detection in a heterogeneous environment.”, (Aubé, 2007), presenta un modelo, denominado SAND (Spectrometer for Aerosol Night Detection) diseñado con el fin de verificar y comparar las predicciones de su modelo con valores medidos. El sistema se complementa con un juego de parámetros ambientales (luminosidad, temperatura y humedad).

### 3.2.2.4.- Excalibur.

Excalibur es un montaje comercial disponible diseñado por el Dr. Jesús Aceituno Castro, del Centro Astronómico Hispano Alemán (Observatorio de Calar Alto). La denominación Excalibur procede de EXtinction Camera and LumInance BackgroUnd Register.

Es un monitor de extinción atmosférica que permite hacer fotometría automatizada en 10 bandas (filtros), lo que permite caracterizar la curva de extinción en todo el rango espectral abarcado, así como determinar el brillo superficial del cielo. Está especialmente indicado para medidas de contaminación lumínica.

Existen dos ejemplares del sistema Excalibur en funcionamiento y hay otros tantos en producción. El más destacado de todos ellos es el prototipo, que lleva funcionando varios años en el Centro Andaluz del Medio Ambiente, en Granada, proporcionando medidas sistemáticas tanto de brillo de fondo de cielo como de extinción atmosférica y contenido de aerosoles.

Su principio de funcionamiento, para la medición de contaminación lumínica, se basa en una cámara CCD, dotada de filtros, acoplada a un telescopio.



**Figura 16 Instrumento Excálibur.** (Fuentes David Galadí Enríquez. Observatorio de Calar Alto / <http://astro-itec.es/desarrollos>)

*“EXCALIBUR (acrónimo del inglés que significa EXtinction CAmera and LIght BackgroUnd Register) es un monitor de extinción que permite hacer fotometría en 10 bandas espectrales que van desde 340nm hasta 1020nm, permitiendo hacer una caracterización de la curva de extinción en dicho rango espectral así como la determinación de la concentración de aerosoles en el lugar de medida.*

*Es un sistema compuesto por un telescopio de 11 pulgadas de apertura, con montura computerizada, que permite realizar apuntados con precisión mejor que 1 minuto de arco. Una cámara CCD acoplada al foco*

*cassegrain del telescopio, con un campo de visión de 23x15 minutos de arco, se encarga de realizar las medidas científicas. Dicha cámara posee una rueda de filtros con 10 posiciones que admite cualquier filtro con un diámetro de 1 1/4 pulgadas. Por defecto se instala los filtros del sistema fotométrico de Johnson, U, B, V, R, I.*

*Debido al campo de visión, el sistema es capaz de resolver astrométricamente cada imagen, corrigiendo posibles fallos en el apuntado del instrumento. De esta manera, el sistema siempre realiza la fotometría sobre estrellas de campos de Landlot. Así mismo, también determina el brillo superficial del cielo en el campo de visión.*

*Un autoguiador permite programar al instrumento a través de una web para poder realizar secuencias automáticas con tiempo de integración largos con un propósito distinto al de determinar la extinción, como fenómenos GRB, búsqueda de transneptunianos, etc.” (iTec\_Astronomica\_S.L.\_EXCALIBUR)*

### 3.2.2.5.- Fotografía con objetivo ojo de pez.

Esta es una técnica realizada con cámara fotográfica (tipo CCD o CMOS) a la que se acopla un objetivo gran angular ojo de pez que permite la fotografía de toda la bóveda celeste. En el caso de fotografía digital, la información puede ser procesada informáticamente y obtener un estudio de la incidencia de la contaminación lumínica en todo el entorno del punto de captura. A diferencia de la fotografía aérea, de la que se obtiene un mapa de la luz radiada desde el suelo hacia el cielo, en este caso se obtiene la fotografía del cielo (nocturna) y se evalúa el impacto de las contaminaciones lumínicas circundantes sobre el lugar de la toma.

El sistema de fotografía puede automatizarse y dotarse de elementos complementarios, como filtrado de espectros, así como de un programa informático capaz de controlar el sistema y procesar los datos. Este sistema permite, mediante mediciones programadas, el estudio de la evolución y alteraciones que puedan producirse en el entorno de parajes protegidos y/o de interés. Este es el caso del proyecto implementado a principios de 2010 en el Parque de Doñana y que se ha mencionado anteriormente.



**Figura 17 Imagen obtenida con objetivo ojo de pez. (Fuente Daniel Paletti – Proyecto ALPI)**

La empresa Itec Astronómica S.L. comercializa, el sistema ASTMON que ya ha utilizado satisfactoriamente en el Observatorio Astronómico de Calar Alto y en Doñana. Este sistema se basa en el proceso mediante ordenador de imágenes captadas con una cámara dotada de objetivo ojo de pez que toma toda la cúpula celestial de horizonte a horizonte y unos filtros para la discriminación de espectros.



**Figura 18 Sistema ASTMON**

*“ASTMON (acrónimo del inglés que significa AllSky Transmision MONitor) es un nuevo instrumento desarrollado para la caracterización y medida de la contaminación lumínica (ver album de fotos). Consiste en un detector CCD (3500x2500 píxeles y 5.5micras) que lleva incorporado una rueda porta filtros de hasta 5 posiciones y un objetivo ojo de pez, que provee al instrumento de un campo de visión de 180 grados en todas las direcciones.”*  
(iTec\_Astronomica\_S.L.\_ASTMON)

Estos sistemas suelen utilizarse en entornos astronómicos y ambientales permitiendo el análisis y estudio de la bóveda celeste sobre el punto de medida. Con esta técnica se puede evaluar un punto concreto del cielo (por ejemplo el cénit) o, por ejemplo para el seguimiento de las fuentes de la contaminación lumínica, el horizonte circundante determinando las zonas de procedencia de la contaminación.

### 3.2.2.6.- Instrumentos de medición de parámetros lumínicos.

Resulta evidente que, al margen de los métodos o instrumentos mencionados, existe la opción de recurrir a los instrumentos clásicos de medición de luz (fotómetros, luxómetros, luminancímetros, etc...), de hecho el SQM visto no deja de ser un luminancímetro que incorpora filtro de IR e incluso lente para cerrar el cono de medición. El espectrofotómetro propuesto por Cinzano es un fotómetro con capacidad de discriminación de espectros.

En el contexto astronómico la utilización directa de luxómetros o de fotómetros no suele ser habitual por cuestiones de sensibilidad (habitualmente los instrumentos comerciales están calibrados para rangos más elevados de luminosidad, en el contexto del alumbrado) así como por la medición puntual que realiza el luminancímetro. Así mismo, en astronomía, se pueden requerir otros condicionantes como filtrado para determinadas bandas o espectros, eliminación de interferencias, transportabilidad, etc...

### 3.2.2.7.- Medida por contraste.

Otro método de medición del brillo del cielo se basa en la medición comparativa entre el brillo de una fuente conocida, variable y medida y el fondo, en este caso el cielo a evaluar. Este método puede realizarse con la utilización de filtros cuando se desee realizar la medida para un determinado espectro. Este sistema es similar al utilizado para la medición de temperaturas por comparativa entre el brillo de un material radiante por su elevada temperatura (por ejemplo en una fundición) y una fuente controlable. Cuando el rojo de la fundición y el rojo de la fuente variable se confunden, se puede obtener la temperatura de la fundición a partir del brillo provocado en la fuente.

En febrero de 2001 apareció en la revista *Sky & Telescope* un artículo firmado por Göte Flodquist, titulado "A simple Dark-Sky Meter". En este artículo se describe un artilugio similar a un pequeño telescopio con un diodo led intercalado y cuyo brillo se ajusta hasta igualar al del cielo obteniéndose una medida en función de la corriente. Inspirado en él, el Departamento de Astrofísica y CC. De la Atmósfera de la Universidad Complutense de Madrid ha desarrollado algunos trabajos dirigidos por los doctores Jaime Zamorano y Jesús Gallego. (Ramírez González, Zamorano, & Gallego, 2001)

### 3.2.3.- Consideraciones en la medición de la contaminación lumínica en astronomía.

A la hora de realizar una evaluación de las condiciones de contaminación lumínica con fines astronómicos no es suficiente la mera medición del parámetro luminoso. Para que la medida pueda utilizarse en la confección de mapas han de tenerse en cuenta las diferencias circunstanciales entre distintos puntos del mapa y que pueden alterar la consideración del mero valor lumínico.

Entre estos parámetros son significativos el estado de nubosidad, la humedad, la presión y temperatura. Así mismo se pueden considerar cuestiones particulares como humos (entornos industriales, “smog”, ...), polvo en suspensión...

En este contexto se habla de extinción atmosférica, en astronomía, en el marco de la absorción y dispersión de la radiación emitida por objetos astronómicos y motivada por la existencia de gas y polvo en suspensión entre emisor y receptor.

En múltiples ocasiones se habla sobre que el problema de los astrónomos no es la luz emitida hacia el cielo por los elementos contaminantes lumínicamente sino la parte de esta luz que se refleja en la atmósfera y las partículas en suspensión y que provocan el llamado halo luminoso que les impide la visibilidad del cielo en condiciones óptimas. Por esta razón tanto los instrumentos relacionados como muchos de los trabajos al respecto centran su atención en esta circunstancia.

Diversos estudios le dan una mayor importancia a la emisión de luz horizontal que a la vertical. Entre las principales razones que se argumentan en esta idea se encuentran el hecho de que la emisión vertical se pierde más rápidamente que la horizontal en tanto que atraviesa menos masa de aire. Esta masa de aire que atraviesa la luz (denominada como “air mass” por los astrónomos) puede llegar a ser hasta 5,6 veces mayor horizontalmente que verticalmente, lo cual provoca una mayor contaminación del cielo. (Upgren, 2006)

---

### **3.3.- El contexto urbano, herramientas de evaluación.**

#### **3.3.1.- Introducción.**

En el marco energético existen diferentes aspectos relacionados con la medición de la luminosidad de las instalaciones.

La elaboración de un proyecto relacionado con la iluminación requiere el cálculo y diseño de la instalación desde el punto de vista energético y de rendimiento luminoso para el cumplimiento de la normativa y requisitos de alumbrado para los que esté destinado.

En este sentido se hace necesario conocer la respuesta de las lámparas y luminarias a utilizar o a decidir utilizar. Para ello se debe elaborar la caracterización de las mismas, dato que generalmente suministran los fabricantes. Así mismo existen programas informáticos que ayudan a la elaboración de estos proyectos mediante la simulación y planteamiento de la instalación y su comportamiento lumínico resultante. Entre estos programas se tiene el DIALUX, un programa que se ha impuesto en el mercado y para el que la mayoría de los fabricantes de mayor relevancia suministran las bases de datos correspondientes a sus luminarias.

En el contexto de la contaminación lumínica, Cinzano propone el programa ROADPOLLUTION para el análisis de instalaciones de alumbrado de carreteras y la evaluación de su impacto ambiental en términos de contaminación lumínica (Cinzano, 2003). Este programa no está destinado para el diseño de instalaciones, para lo que el propio Cinzano propone otros más específicos y certificados. El mismo puede utilizarse como informe complementario a un diseño terminado e incluso como ayuda para presentar las cualidades de la instalación al público, usuarios y opinión pública.

Desde otro punto de vista, en otras ocasiones, se requiere la medición en campo de instalaciones ya implementadas. Bajo este concepto se encuentran el estudio de instalaciones ya existente, la verificación de nuevas instalaciones, inspecciones, elaboración de mapas, ... En esta situación también se encuentran Ayuntamientos y entidades interesadas en conocer el

estado actual de instalaciones y zonas o áreas determinadas para su seguimiento y/o adopción de medidas correctoras.

En este contexto para el estudio de instalaciones ejecutadas, proyectos de actuación, inspecciones, auditorías, ... se contempla la necesidad de realizar mediciones en campo de las mismas. En ocasiones el contexto utiliza la confección de mapas de la zona, instalación, ciudad o lugar a evaluar.

Recientemente se están realizando propuestas orientadas a la modelización de los entornos urbanos y a la evaluación de la contaminación lumínica por modelos y caracterizaciones más que por mediciones físicas que, amén de la dificultad que entrañan, dependen de otros parámetros como niveles de contaminación atmosférica, momento de la(s) medición(es), aspectos climatológicos, fase lunar, ... En este sentido se están desarrollando trabajos para caracterizar el comportamiento contaminante lumínicamente de los entornos urbanos. Podemos reseñar la tesis doctoral “Caracterización de la intensidad luminosa responsable de la contaminación lumínica en entornos urbanos”, realizada por Dña. Liliana Patricia Meléndez Rúa y dirigida por el doctor D. Carlos Sierra Garriga, Barcelona, Junio 2015, donde se proponen modelos matemáticos que cuantifican la contaminación lumínica incorporando múltiples parámetros incluyendo algunos como orografía del terreno o arboleda, amén de los básicos (luminarias, reflexiones del terreno, ...). En la línea de los modelos predictivos podemos así mismo mencionar la tesis doctoral "Medición de la contaminación lumínica en espacios naturales. Propuesta de un modelo predictivo" realizada por D. Héctor Antonio Solano Lamphar y dirigida por el doctor D. Ramón San Martín Páramo, Barcelona 2010, donde se propone “una propuesta de modelo para la caracterización de la contaminación lumínica en espacios afectados por la iluminación artificial nocturna proveniente de focos contaminantes identificados”.

### **3.3.2.- El contexto urbano.**

Se puede considerar el contexto urbano como el origen principal de la contaminación lumínica. Otras fuentes pueden estar en instalaciones industriales, zonas militares, ... pero, en definitiva, procedentes de actividades humanas. El alumbrado nocturno constituye una de las principales fuentes de esta contaminación. Sin embargo, su medición no se puede reducir a una mera cuantificación de parámetros lumínicos. Los diferentes aspectos contemplados por

la contaminación lumínica nos llevan a considerar diferentes metodologías e instrumentación para la medida de ésta.

En este sentido se pueden extraer los siguientes aspectos:

- La contaminación lumínica urbana es el origen de la contaminación lumínica de otros entornos (ambiental, astronómico,...). Diferentes estudios buscan la evaluación de los efectos producidos por esta contaminación. Generalmente se utilizan mapas de contaminación, mediciones desde los centros afectados en su perímetro, campañas, ...)
- Determinación del concepto de alumbrado útil y alumbrado no útil. Existe una débil frontera entre lo que se considera contaminación lumínica y lo que se considera servicios a la actividad humana en localidades habitadas (actividad comercial, ocio, visibilidad, circulación, seguridad vial, tráfico rodado,...). Aún así, determinadas concepciones extremas pueden definir como contaminación lumínica la mera alteración del medio. En este sentido entraríamos en discusiones más filosóficas que técnicas que nos llevarían a consideraciones sobre el inalcanzable equilibrio de la naturaleza frente a la evolución del hombre. Afortunadamente, en este trabajo nos ceñiremos al contexto técnico de la medición.
- Rendimiento energético. Si nos atenemos a la normativa, la ITC-EA-03 referida a lo que el legislador denomina “resplandor luminoso nocturno o contaminación lumínica”, pertenece al “Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus Instrucciones técnicas complementarias EA-01 a EA-07” (RD-1890/2008, de 14 de noviembre). En este reglamento se regulan las instalaciones de alumbrado en el marco de la eficiencia energética y del rendimiento de las instalaciones. Sólo en la mencionada ITC-EA-03 se contempla el resplandor luminoso nocturno bajo el aspecto de establecer limitaciones de las emisiones luminosas, en particular hacia el cielo (Flujo Hemisférico Superior) así como con una zonificación limitando la luz intrusa o molesta procedente de alumbrado exterior.

### 3.3.3.- Herramientas de medición, contexto urbano.

A tenor de lo mencionado anteriormente, en el contexto urbano se utilizan distintas técnicas y herramientas de medición relacionadas con la contaminación lumínica dependiendo del objeto de la medición.

Al igual que en el contexto astronómico, en el contexto energético se elaboran mapas de contaminación lumínica. La menor extensión de las áreas puede requerir mayor definición que la ofrecida por los satélites. Una alternativa es la fotografía aérea que permite mayor localización y definición. Así mismo se utilizan otros métodos para la confección de mapas como vehículos dotados de sensores y que recorren y registran tramas del mapa a realizar. Proyectos como el del “Delta del Ebro” o el denominado “21.69”, referenciados más adelante, utilizan este sistema.

Los sistemas de alumbrado constituyen el principal foco de actuación en el contexto urbano ya que son la principal fuente de contaminación así como el principal objeto de aplicación del alumbrado nocturno. La normativa aplicable y sus requisitos de medición son pues el principal condicionante de los sistemas de medida. Así mismo, en alumbrado diurno, la iluminación de túneles constituye también un contexto de utilización de herramientas de medición, si bien no de contaminación lumínica propiamente dicha, sí como mercado de estas herramientas.

#### 3.3.3.1.- Fotografía aérea.

La principal diferencia con los mapas astronómicos puede radicar en la menor escala y resolución requeridas. En el documento “CIESIN Thematic Guide to Night-time Light Remote Sensing and its Applications” de Christopher N.H. Doll (Doll, CIESIN Thematic Guide to Night-time Light Remote Sensing and its Applications, 2008) se evalúan métodos como el sistema DMSP-OLS, utilizado en mapas astronómicos, y otros entre los que se recurre a la fotografía aérea nocturna, como la Figura 19.

La fotografía aérea presenta ventajas respecto a la fotografía desde satélites como el hecho de que la intervención de la atmósfera es menor ya que la altura a la que se realiza es menor. En todo caso comparte con la misma el inconveniente de que realmente el interés

principal no se centra en lo que se emite al espacio sino en lo que se refleja. En todo caso, en el contexto urbano, resulta de interés el estudio, principalmente energético, de la luz emitida al exterior que se puede considerar despilfarrada.



**Figura 19** Comparativa diurna y nocturna de Las Vegas obtenidas con un avión ER-2 (Fuente Christopher N.H. Doll)

### 3.3.3.2.- El sistema LPDM (Light Pollution Mobile Detector).

Existen multitud de proyectos con fines similares, es decir la elaboración de mapas de contaminación lumínica en zonas o áreas concretas. Unos, como el proyecto de Doñana, recurren a bases de datos obtenidas de satélites, en tanto que otros recurren a recorrer la zona con un vehículo dotado de sensores lumínicos y otros de apoyo (GPS, cámara de vídeo, ...). Entre estos, al margen de los mencionados sobre la Desembocadura del Ebro ó el 21.69, se puede nombrar el sistema LPDM (Light Pollution Mobile Detector), de Thierry Hanon-Degroote (Hanon-Degroote). Éste es un dispositivo integrado que se coloca en la parte delantera o trasera de un vehículo. Dispone de tres sensores de luminosidad funcionando simultáneamente, que cubren desde la luz visible hasta las proximidades del infrarrojos, desde 100.000 Lux hasta 100 microLux. El sistema está calibrado para tomar medidas en un cono compatible con un SQM-L (Sky Quality Meter) que sirve para el calibrado periódico del mismo. En paralelo, un Luxómetro (adaptado) sirve de segunda verificación. El recorrido se traza simultáneamente con un GPS que permite la elaboración de los ficheros de datos

correspondientes a las mediciones efectuadas. Durante la captura se realiza una película de vídeo que ayuda al análisis de “puntos especiales” detectados (por ejemplo la entrada en un túnel). Esta película permite descartar puntos no significativos o justificar excepciones.

Con la ayuda del programa Google Earth se recomponen los datos y se traza el recorrido.



**Figura 20** Ejemplo de trazado por Thierry con la ayuda del Google Earth. (Fuente Association pour la Sauvegarde du Ciel e de l'Environnement Nocturnes ASBL)

En la misma línea se han realizado otros trabajos más recientes como el titulado “GPS based measured system for urban lighting” (Sierra\_Garriga, Sanz\_Ciria, González\_Benítez, & García-Cascales, 2013) aportando mejoras sustanciales como la separación de los sensores del vehículo mediante remolque y la utilización de otro vehículo para minimizar la interferencia de las luces de otros vehículos. Así mismo se han realizado pruebas de apantallamiento de sensores, corrección de ángulos y distancias y pruebas de validación en campo en Barcelona.

### **3.3.3.3.- Cámaras fotográficas calibradas .**

Existen en el mercado cámaras fotográficas que determinadas marcas comercializan como « equipos para medida de luminancia ». El modelo « LMK mobile advanced » (Figura 22) de TechnoTeam se basa en una cámara Canon EOS 450D calibrada y ofrece precisiones superiores al 5,8% y alcanzando incluso del 8,8% en especificaciones y con repetibilidad entre el 1,3% y el 4,3%. El fabricante no lo oferta como cámara fotográfica sino como un modelo « portátil » de su gama LMK de fotómetros y con precios que superan los 10.000 euros, objetivo y accesorios aparte.

Estas cámaras y sus accesorios han sido calibradas por el fabricante específicamente por lo que alcanzan un coste muy elevado. En tal sentido, como acabamos de indicar, la configuración mínima de la cámara Canon EOS 550D con objetivo y accesorio supera los mencionados 10.000 euros cuando dicha cámara no alcanza los 500 euros en el mercado.



Figura 22 LMK mobile advanced

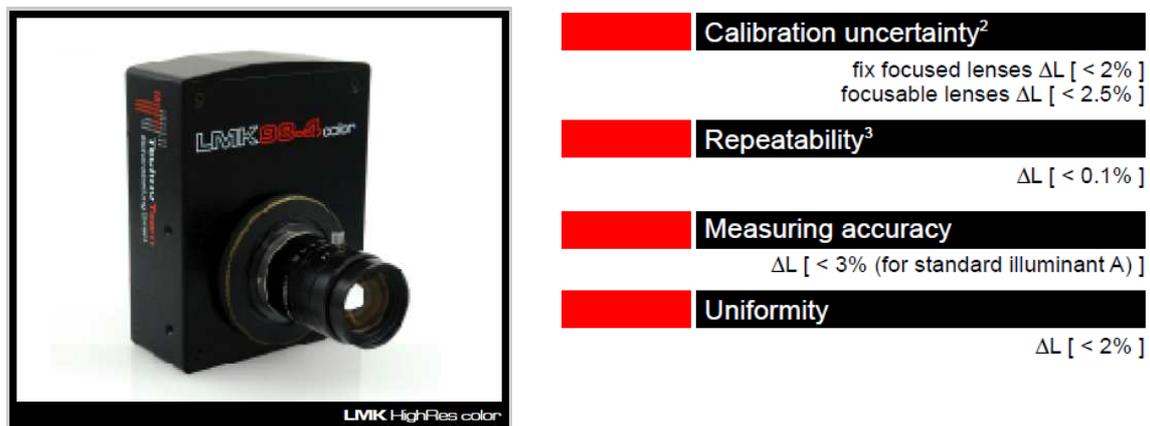


Figura 21 Video Fotómetro LMK 98-4

En contrapartida sus modelos basados en dispositivos específicos ofrecen características y prestaciones mencionadas como las ruedas de filtros y precisiones inferiores al 2% y repetibilidad inferior al 0,1%. (Figura 21)

### 3.3.3.4.- Luxómetros y luminancímetros.

La medida de parámetros lumínicos, en el marco energético, con los instrumentos clásicos, ofrece dos perspectivas. De una parte la medición de valores en instalaciones realizadas y de otra la caracterización de lámparas.

Bajo la primera perspectiva esta medida consiste en la evaluación de valores clásicos de luminancia e iluminancia, al margen de otras caracterizaciones de entorno como reflexiones, trama y demás condiciones de la instalación.

A modo de ejemplo, el “Protocolo de auditoría energética de las instalaciones de alumbrado público exterior”, publicado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía junto con el Comité Español de Iluminación del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio en Octubre de 2008 (IDAE, 2008) señala los instrumentos necesarios para la verificación de los parámetros lumínicos de este tipo de instalaciones:

*a) El Auditor realizará las mediciones correspondientes de todos los parámetros eléctricos incluidos en las fichas, como pueden ser:*

- *Tensión entre fases, fases y neutro*
- *Corriente en cada fase*
- *Potencia activa*
- *Potencia reactiva*
- *Factor de potencia*
- *etc.*

*b) Igualmente, realizará las mediciones y cálculos de los parámetros lumínicos de cada tipo de instalación:*

- *Flujos luminosos y niveles de iluminación*
- *Luminancias e iluminancias*
- *etc.*

*c) Para la realización de estas mediciones y la obtención de los datos necesarios, el Auditor deberá disponer de los equipos de medida necesarios, tales como:*

- *Registradores de intensidad y tensión*
- *Tenaza amperimétrica y voltimétrica*
- *Analizador de redes*
- ***Luxómetro - luminancímetro***
- *etc.*

Quizás influenciado por la medición clásica hasta ese momento la medida de parámetros lumínicos la reduce al uso de luxómetros y luminancímetros. En este sentido no se contempla la utilización de cámaras fotográficas, si bien posteriores guías y otras recomendaciones sí avanzan la utilización de estos dispositivos (García Gil, 2011). Ha de tenerse en cuenta que esas fechas coinciden con los inicios de la introducción de la contaminación lumínica en los contextos normativos de instalaciones eléctricas así como los

efectos de los costes de la eficiencia energética tanto en términos económicos como en términos medioambientales.

La oferta de instrumentos luxómetros, luminancímetros y demás relacionados con la medición de la luminosidad es tan amplia en el mercado que resultaría imposible reflejarlos en este trabajo. Existe una amplia multitud de fabricantes, marcas y modelos.

Los propios fabricantes ofrecen una amplia gama de instrumentos e incluso accesorios para adaptar las mediciones. Como ejemplo, las figuras adjuntas ilustran un luxómetro con un accesorio que permite convertirlo en luminancímetro.

Los ejemplos adjuntos son una mínima ilustración ejemplo de modelos del mercado.

#### **3.3.3.4.1.- Luxómetro MAVOLUX 5032C/B.**

El luxómetro Mavolux 5032C y el 5032B mide la intensidad de luz para utilizar en la industria, talleres, institutos, estudios de fotografía están clasificados según DIN 5032 / 7 y CIE no.69.

- Luxómetro para la medición de la densidad luminosa en  $\text{cd}/\text{m}^2$  con el adaptador para densidad luminosa (componente).
- El luxómetro tiene un fotodiodo de silicio con filtro V (1) según la normativa de protección laboral.
- Luxómetro clasificado según DIN 5032/T7 y CIE no. 69.
- La sensibilidad espectral del luxómetro es equiparable a la de los ojos.
- Corrección de coseno para luz con incidencia oblicua.



**Figura 23 Luxómetro Mavolux**

#### **3.3.3.4.2.- Adaptador para densidad luminosa.**

El adaptador para densidad luminosa se coloca delante del sensor de luz y convierte al luxómetro Mavolux 5032C y 5032 B en un medidor de densidad luminosa. La unidad a emplear ahora será candela/ $\text{m}^2$  ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ). (Figura 24)



**Figura 24 Adaptador**

### 3.3.3.4.3.- Medidor de luminancia Konica Minolta LS-100 / LS-110

El luminancímetro Konica Minolta LS-100/LS-110 (Figura 25) es un clásico en la medida de luminancia en todos los contextos y se encuentra presente en la mayoría de los trabajos vistos en este mismo trabajo.

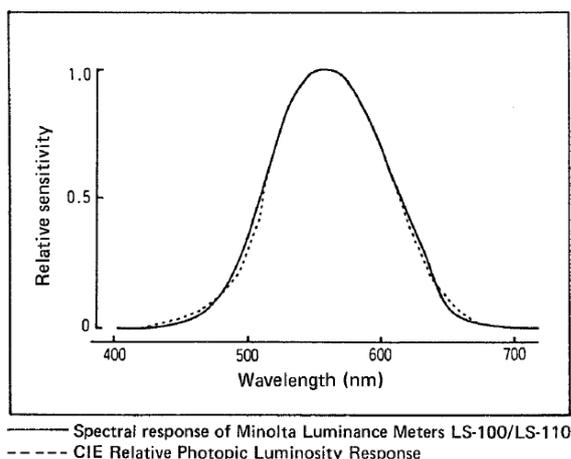


Figura 25 Luminancímetro Konica Minolta LS-100 / LS-110

Este equipo es el que se ha utilizado en nuestro trabajo para las mediciones y calibraciones realizadas. Entre sus características principales se encuentran su amplio rango de medida, su ángulo de aceptación y respuesta fotópica que cumplen los requisitos de la normativa y sus rangos de precisiones.

Alguna de las consideraciones que se hacen en este trabajo sobre la idoneidad de este instrumento para la evaluación de la contaminación lumínica se centran en el hecho de que este instrumento (en general los luminancímetros comerciales) tiene su respuesta centrada en la respuesta fotópica del ojo humano. De hecho indica disponer de un filtro en tal sentido. Por esta razón, si consideramos que la contaminación lumínica no sólo se refleja en este espectro, este tipo de instrumento podría no ser idóneo, al menos en lo que bajo esta perspectiva se plantea. En todo caso, y relevando la importancia de esta consideración, el propio fabricante entrega una tabla de compensaciones según el tipo de iluminación utilizada (Figura 27). En este sentido cabría también considerar que en el caso de una escena múltiple, por ejemplo una zona urbana iluminada por diversas fuentes y zonas, la mezcla de tipos de iluminantes podría provocar diferencias de mediciones y consideraciones al respecto.

## SPECTRAL RESPONSE



**Figura 26** Respuesta espectral del LS-110

Por otra parte, el cambio continuo de tecnologías tampoco queda cubierto y se abre como líneas de futuro a incluir, como se propone en el capítulo respectivo de este trabajo. Así, la tecnología LED, de muy reciente implementación, no figura en la tabla de compensaciones suministrada por el fabricante (Figura 27):

**Approximate color-correction factors of common light sources**

ILLUMINANT:	COLOR-CORRECTION FACTOR:
CIE Standard Illuminant B	1.007
CIE Standard Illuminant C	1.010
CIE Standard Illuminant D <sub>65</sub>	1.011
Daylight fluorescent lamp (F5)	1.013
White fluorescent lamp (F6)	1.008
Three-band fluorescent lamp*	1.005
High-pressure mercury lamp*	1.007
High-pressure sodium lamp*	1.009
Metal halide lamp (3-additive)*	1.014
Metal halide lamp (rare-earth)*	1.009
Fluorescent display (Material: ZnO;Zn)*	1.022
Color CRT-red*	0.995
Color CRT-green*	1.018
Color CRT-blue*	1.123
Color CRT-white*	1.023
CIE Standard Illuminant A + Y-44	1.000
CIE Standard Illuminant A + O-54	0.987
CIE Standard Illuminant A + R-64	0.856

\* Color-correction factor calculated based on figure 1 of CIE publication 53: "Detectors".

**Figura 27** Compensación según fuente iluminante

Otra observación a considerar en la utilización de este instrumento es que, si bien la medida se considera puntual, en realidad se refiere a un estrecho ángulo de apertura (Figura 28), en este caso de 1/3 de grado, entendiéndose que el valor reflejado se corresponde con la media integrada de los valores abarcados por dicha apertura. En nuestro caso, dada la estrechez de dicha apertura y el contexto donde nos encontramos, el error que esto pueda suponer no resulta significativo ya que hablamos de superficies amplias, distancias medias y

distribuciones no abruptas. Sí se ha tenido en cuenta una consideración a la hora de proponer la cámara digital como alternativa. En este sentido, un pixel de la cámara supondría un ángulo mucho más estrecho y las diferencias entre píxeles próximos sí pueden no reflejar un valor medio de la zona. Por esta razón, en nuestro trabajo, se han incluido la posibilidad de evaluar la luminancia puntualmente (por pixel) o por media entre píxeles circundantes, de 9 y de 25 puntos.

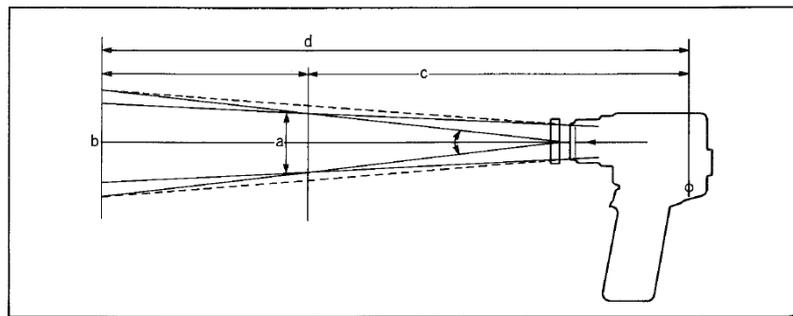


Figura 28 Ángulo de apertura en el LS-110

En lo referente a la tecnología utilizada, como se analiza en el capítulo 5, la misma resulta bastante similar a la de las cámaras fotográficas (Figura 29)

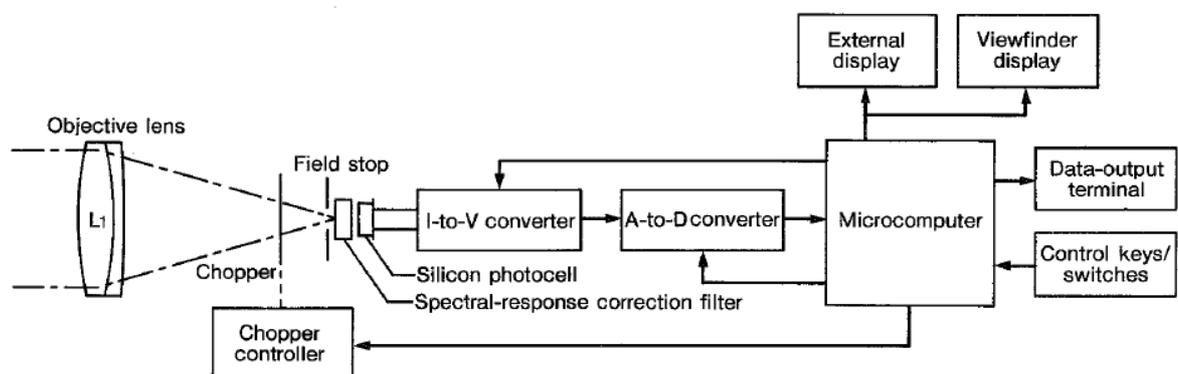


Figura 29 Tecnología del LS-110

### 3.3.3.5.- Caracterización de lámparas y luminarias: Goniofotómetro y Esfera de Ulbricht.

Bajo otra perspectiva, en el ámbito energético, se necesita caracterizar las lámparas y luminarias con objeto de modelizar su comportamiento a la hora de diseñar las instalaciones donde emplazarlas. La caracterización de las lámparas pasa por la medición espacial entorno a la misma de los niveles de luz suministrados por las mismas.

Un instrumento clásico para esta caracterización del comportamiento de las lámparas es el goniofotómetro. Un goniofotómetro se define como un fotómetro especializado en la medida de la variación angular de una determinada magnitud fotométrica, como por ejemplo la iluminancia, intensidad luminosa, etc. Consta de un sistema óptico-fotométrico (detector + filtro fotométrico + diafragmas + amplificador) montado sobre un sistema posicionador que le permite el movimiento relativo con respecto a la fuente luminosa o luminaria que se desea evaluar.

Un ejemplo de un desarrollo de un goniofotómetro para caracterización de luminarias (Figura 30) ha sido el proyecto coordinado en el que han participado el Grupo de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Málaga y el Grupo de Óptica de la Universidad de Granada así como la empresa del Parque Tecnológico de Andalucía denominada Centro de las Tecnologías de las Comunicaciones (CETECOM). (Muñoz, Gómez de Gabriel, Fernández Lozano, Molina-Mesa, & Serón-Barba)



Figura 30 Detalle del brazo principal del goniofotómetro (Fuente V. F. Muñoz y otros).

Otro instrumento clásico que permite la medición del flujo luminoso de una lámpara o fuente luminosa es la Esfera de Ulbricht (Figura 31). Una esfera fotométrica mide el flujo luminoso por comparación de la fuente luminosa con otras fuentes estándar. Esta técnica es apropiada para la caracterización de fuentes cuyo flujo varía bruscamente (lámparas tipo *flash*) y para la medida del flujo luminoso como función del tiempo. La esfera de Ulbricht se ha utilizado en algunos trabajos de instrumentación para medida de luminancia como fuente caracterizada de luz. En otros trabajos como el nuestro se ha utilizado la esfera de Ulbricht para garantizar una distribución homogénea de la luminancia sobre un patrón.



**Figura 31 Esfera de Ulbricht (Fuente Indalux)**

La esfera de Ulbricht tiene otra utilidad añadida que consiste en poder generar patrones homogéneos de luminosidad para realizar medidas a iluminación constante. Aprovechando la dispersión aleatoria que realiza de la fuente por su concepción esférica, la luz que alcanza un patrón en su interior presenta una distribución muy homogénea. En este sentido sus resultados son más precisos que los obtenidos por iluminación directa del patrón con focos o luminarias, incluso con difusores, ya que éstos, al final siempre presentan una distribución no homogénea de la luminosidad. Este problema se ve realzado cuando las distancias no son elevadas, caso de pruebas en bancos de laboratorio.

### 3.4.- El contexto biológico, herramientas de evaluación

El contexto biológico también es uno de los contextos en los que la contaminación lumínica está tomando una importancia considerable. Son muchos los trabajos realizados analizando la influencia de esta contaminación en el entorno animal y vegetal.

En el mundo animal la luz nocturna se convierte en una atracción para muchas especies terrestres, aéreas y marinas.

Dentro del contexto biológico se incluyen también los efectos de la contaminación lumínica en la salud humana. En este sentido los estudios también suelen estar centrados en el marco urbano, lugar prevalente de asentamiento humano.

En lo relativo a los instrumentos de medida de la contaminación lumínica, producida principalmente por las ciudades, la instrumentación utilizada puede parecer ser similar a la utilizada en astronomía fundamentalmente en la medida del halo luminoso producido en los entornos urbanos. Existe sin embargo cierta diferencia en lo relativo al punto de vista de la medición. En astronomía el principal interés se encuentra en el brillo luminoso que se produce en el cielo visto desde la posición del astrónomo. De hecho algunos autores señalan que la medida de la cantidad de luz que emite un foco hacia el cielo, vista desde el cielo, no refleja realmente una medida de interés para el astrónomo, dado que esa luz se pierde en el infinito. La que realmente interesa es la reflejada por la atmósfera y que es la que provoca el brillo en el mismo visto desde abajo. (Galadí Enriquez, 2008). En este sentido el interés de la medida está en el brillo del cielo así como en el horizonte circundante para la detección de las fuentes origen de la contaminación. Como ya hemos dicho, son varios los estudios que denotan que la contaminación lumínica resulta más perjudicial en las emisiones horizontales que en las verticales.

En el caso del entorno medioambiental un interés particular, amén de los parámetros de intensidades y espectros, se centra fundamentalmente en el horizonte circundante a la zona protegida ya que son estas luces las que pueden provocar la atracción y migración de animales desde la zona protegida a las fuentes de luz. Existe así mismo otra visión de interés que se produce en la propia fuente contaminante, es decir en el entorno urbano, por los efectos sobre los animales residentes así como sobre la vegetación.

La zonificación, que es una de las medidas que se consideran en las normativas, también considera zonas de reservas naturales como los parques de Doñana y otros contextos a proteger.

Como se ha reseñado en capítulos anteriores, existen multitud de estudios particularizados a determinados entornos naturales. Al comienzo de este trabajo ya se habían realizado algunos de relevancia en España como lo fueron el del parque de Doñana o el de la desembocadura del Ebro. A lo largo de estos años han proliferado este tipo de estudios tanto a nivel nacional como internacional poniendo de relevancia la importancia de los daños provocados por esta contaminación en estos entornos. Estos trabajos han ido desde el estudio de los efectos sobre especies concretas (tortugas, ranas, aves, ...) hasta estudios propios de la contaminación en un determinado entornos. Recientemente una noticia publicada por el diario ABC revelaba que investigadores del Laboratorio de Biología Marina (LBM) de la Universidad de Sevilla, en colaboración con el Australian Museum de Sídney, han comprobado los efectos de la contaminación lumínica costera sobre la fauna microscópica marina. (Navarro\_Barranco & Hughes, 2015)

En este sentido, la fotografía digital se revela como una solución idónea como instrumento de medida en tanto que permite la medición de la cúpula del cielo nocturno centrando el interés en los horizontes, a diferencia del contexto astronómico cuyo interés principal está en el cenit (aunque el estudio de horizontes también se incluye a la hora de analizar la procedencia de la contaminación).

El contexto medioambiental se postula como una línea de estudios futuros muy amplia porque las particularizaciones tanto de efectos como de métodos de medición de la contaminación lumínica son muy variadas. Algunos estudios ya anticipan este planteamiento y señalan que las actuales metodologías de medición de la contaminación lumínica bajo aspectos urbanos y astronómicos no tienen en consideración las particularidades de los diferentes entornos biológicos. (Longcore & Rich, 2004)

### 3.5.- Otros instrumentos complementarios.

Aunque no sean instrumentos de medida relativos a la luminosidad, la evaluación de la contaminación lumínica suele comportar el uso de instrumentos complementarios según los objetivos a cubrir. El Protocolo de Auditoría Energética de las instalaciones de alumbrado público exterior de Octubre de 2008 ya relaciona instrumentos a utilizar en la evaluación de las instalaciones mencionadas, como ya hemos indicado en otros apartados:

*Para la realización de estas mediciones y la obtención de los datos necesarios, el Auditor deberá disponer de los equipos de medida necesarios, tales como:*

- *Registradores de intensidad y tensión*
- *Tenaza amperimétrica y voltimétrica*
- *Analizador de redes*
- *Luxómetro - luminancímetro*
- *etc.*

Algunos de los instrumentos complementarios que nosotros hemos utilizado en algún momento son:

**Voltímetro.** Para la medición de la tensión en instalaciones de alumbrado. Algunas normativas requieren la medida del voltaje de la instalación para su relación con la emisión luminosa de la instalación a evaluar. (ITC-EA-07). En algún caso se requiere el uso de voltímetros registradores para registrar el valor de la tensión suministrada durante el proceso de medición de los parámetros luminotécnicos.

**Brújula.** Para la medición de la orientación de las fuentes de procedencia de los puntos evaluados.

**GPS.** Sistemas de posicionamiento geográfico para el trazado de mapas y/o localización de los puntos de medición.



# Capítulo 4.- Proyectos y grupos de trabajo relevantes.

## 4.1.- Introducción.

En este capítulo se presentan proyectos y grupos de trabajo relevantes en el contexto de la contaminación lumínica con objeto de situar nuestro trabajo en un marco conocido. El mismo se presenta así mismo como un estado del arte del contexto. Cabe reseñar que este estudio se comenzó durante el curso de doctorado del DEA previo a la realización de esta tesis y se ha podido constatar cómo en pocos años se han producido cambios y evoluciones importantes. La reciente consideración de la contaminación lumínica, tanto en el marco social como en el de las normativas y legislaciones que la empezaban a contemplar, ha ido provocando a veces cambios paralelos o simultáneos al desarrollo del estudio. De hecho, algunos de los proyectos y trabajos relevantes mencionados en este capítulo han surgido durante este período. Cabe indicar que se trata de una muestra internacional y nacional a modo de ejemplo siendo imposible reseñar a todas las existentes.

## 4.2.- International Dark-Sky Association



Fundada en 1988, la IDA se postula como de las primeras organizaciones en llamar la atención sobre los peligros de la contaminación lumínica y se dedica a proteger el cielo nocturno para las generaciones actuales y futuras.

Promueve una idea simple: la luz lo necesario, cuando se necesite. Conscientes de que la luz en la noche es necesaria para la seguridad y la recreación trabajan con los fabricantes, planificadores, legisladores y ciudadanos para proporcionar opciones de eficiencia energética y minimizar los efectos de la contaminación lumínica.

Actualmente se ha consolidado como una de las organizaciones más referenciadas en los trabajos relacionados con la contaminación lumínica.

### 4.3.- Globe at night



Globe at Night es un programa internacional de la organización del “National Optical Astronomy Observatory”, el centro de astronomía nocturna terrestre de Estados Unidos, operado por la “Association of Universities for Research in Astronomy (AURA)”, y en colaboración con la “National Science Foundation”.

Globe at Night es un programa seguido por miles de personas y organizaciones en el mundo que consiste en observar el cielo y realizar una medida visual de la contaminación luminosa. La edición 2010 fué la quinta organizada. La campaña 2009 permitió, durante 2 semanas, realizar 15.300 observaciones. Actualmente se encuentra ya lanzada la edición 2016.

En colaboración con otras organizaciones y mediante internet se realiza la convocatoria anual internacional solicitando la colaboración de todo aquél que desee hacerlo.

En las páginas web de las organizaciones colaboradoras se presenta un protocolo a seguir para la medición, consistente en localizar la constelación de Orión (que se utiliza de patrón por su facilidad de localización) sobre una hora después de la puesta del sol. Después

se espera unos veinte minutos para conseguir la adaptación del ojo y se comparan los modelos suministrados con el número de estrellas visibles. Para ello se suministran modelos correspondientes a distintas magnitudes de contaminación lumínica y un formulario a rellenar y enviar.

Estos cuestionarios pueden ser sencillos con pocos parámetros (coordenadas geográficas del punto de medida, estado de cobertura de nubes, día, hora y algún comentario) o más complejos incluyendo incluso medidas con el Sky Quality Meter.

La escala utilizada se realiza en “magnitud” que es una unidad de medida astronómica.

A partir de los datos recibidos se realiza un mapa con los resultados. Estas campañas permiten la obtención de mapas para su estudio y análisis de la evolución así como para la concienciación de la ciudadanía.

#### 4.4.- Declaración de la Palma:

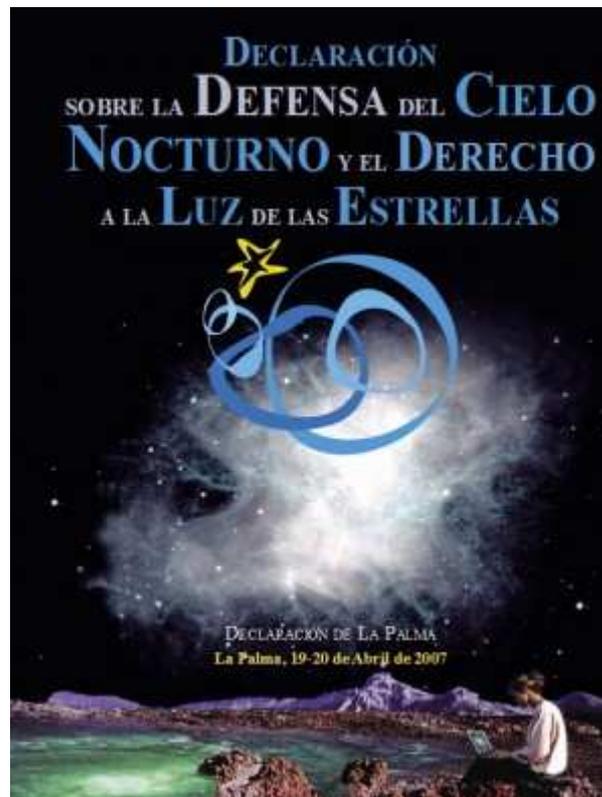


Figura 32 Declaración de la Palma

En la Conferencia Mundial Starlight de 2007, mencionada en la sección Starlight, se redactó la “Declaración sobre la defensa del cielo nocturno y el derecho a la luz de las estrellas”, también conocida como Declaración de La Palma.

Los participantes en la Conferencia Internacional en Defensa de la Calidad del Cielo Nocturno y el Derecho a Observar las Estrellas, reunidos en La Palma, Islas Canarias, España, el 19 y 20 de Abril de 2007, conjuntamente con representantes de la UNESCO, OMT, IAU, PNUMA-CMS, CE, SCDB, COE, Programa MaB y Convención Ramsar, redactaron y ratificaron un documento en el que se reclamaba e incentivaba la defensa del cielo nocturno y el derecho a la luz de las estrellas.

Los puntos más destacados de esta declaración son:

- 1.-** El derecho a un cielo nocturno no contaminado que permita disfrutar de la contemplación del firmamento, debe considerarse como un derecho inalienable de la Humanidad, equiparable al resto de los derechos ambientales, sociales y culturales, atendiendo a su incidencia en el desarrollo de todos los pueblos y a su repercusión en la conservación de la diversidad biológica.
- 2.-** La progresiva degradación del cielo nocturno ha de ser considerada como un riesgo inminente que hay que afrontar, de la misma manera que se abordan los principales problemas relativos al medio ambiente y a los recursos patrimoniales.
- 3.-** La conservación, la protección y la puesta en valor del patrimonio natural y cultural asociado a la visión del firmamento, representa un ámbito privilegiado para la cooperación y defensa de la calidad de vida. Por parte de todos los responsables, esta actitud implica un auténtico reto de innovación cultural, tecnológica y científica, que exige realizar un esfuerzo continuado que haga posible redescubrir el valor del cielo nocturno como parte viva de nuestro legado patrimonial y de nuestra cultura cotidiana.
- 4.-** El conocimiento, apoyado en la educación, constituye la clave que permite integrar la ciencia en nuestra cultura actual, contribuyendo al avance de la Humanidad. La difusión de la

---

astronomía, así como la promoción de los valores científicos y culturales asociados a la contemplación del firmamento, deberán considerarse como contenidos básicos a incluir en la actividad educativa en todos los ámbitos, algo imposible de realizar si no se dispone de un cielo poco contaminado y de una apropiada formación de los educadores en estas materias.

**5.-** Los efectos negativos sobre la calidad atmosférica de los cielos nocturnos en los espacios naturales, causados por el incremento de las emisiones y la intrusión de la luz artificial, afectan gravemente a muchas especies, hábitats y ecosistemas. El control de la contaminación lumínica debe por lo tanto ser un requisito básico en las políticas de conservación de la naturaleza, incorporando esta dimensión en la gestión de las áreas protegidas, garantizando de forma más efectiva la protección del medio natural y la conservación de la diversidad biológica.

**6.-** Habida cuenta que la noche estrellada forma parte integrante del paisaje que la población de cada territorio percibe, incluyendo las áreas urbanas, se considera necesario que las políticas de paisaje desarrolladas en los diferentes ordenamientos jurídicos incorporen las normas correspondientes orientadas a la preservación de la calidad del cielo nocturno, permitiendo así garantizar el derecho de todos a la contemplación del firmamento.

**7.-** Ha de promoverse el uso racional de la iluminación artificial, de tal forma que el resplandor que provoca en el cielo se reduzca a un mínimo aceptable, evitando igualmente los impactos nocivos sobre los seres humanos y la vida en la naturaleza. Las administraciones públicas, la industria de la iluminación y los principales actores que inciden en la toma de decisiones, han de asegurar un uso responsable de la luz artificial por parte de todos los usuarios, integrando esta dimensión en la planificación y en las políticas de sostenibilidad energética, las cuales habrán de apoyarse en mediciones de la contaminación lumínica, tanto desde la tierra como desde el espacio. Tal actitud implica un uso más eficiente de la energía en consonancia con los acuerdos sobre el cambio climático y la protección del medio ambiente.

**8.-** Los ámbitos privilegiados para la observación astronómica constituyen un bien escaso en el planeta, y su conservación representa un esfuerzo mínimo en comparación con los beneficios que aportan al conocimiento y al desarrollo científico y tecnológico. La protección

de la calidad de los cielos en estos espacios singulares deberá constituir una prioridad en las políticas medioambientales y científicas de carácter regional, nacional e internacional. Habrán de extremarse las medidas y disposiciones que permitan proteger tales espacios de los efectos nocivos de la contaminación lumínica, radioeléctrica y atmosférica.

**9.-** Al igual que otras actividades, el turismo puede convertirse en un poderoso instrumento para desarrollar una nueva alianza en favor de la calidad del cielo nocturno. El turismo responsable puede y debe integrar el paisaje del cielo nocturno como un recurso a resguardar y valorar en cada destino. La generación de nuevos productos turísticos basados en la observación del firmamento y los fenómenos de la noche, abre posibilidades insospechadas de cooperación entre los actores turísticos, las comunidades locales y las instituciones científicas.

**10.-** Los espacios pertenecientes a la Red Mundial de Reservas de la Biosfera, los Sitios Ramsar, los declarados Patrimonio de la Humanidad, los Parques Nacionales o las Reservas Naturales que combinan valores excepcionales naturales o paisajísticos dependientes de la calidad del cielo nocturno, están llamados a integrar la protección de los cielos limpios como un factor clave que refuerza su función de conservación de la naturaleza.

#### **4.5.- Red Española de estudios sobre la contaminación lumínica.**



Como se indica en su página web, la contaminación lumínica es un problema ambiental, económico y social de gran impacto. Los investigadores dedicados a este campo pertenecen a diferentes áreas de conocimiento y abordan su estudio desde perspectivas muy diversas. La interacción entre ellos resulta escasa. Esta red pretende reunir a los diferentes grupos de investigación sobre contaminación lumínica que trabajan en España para facilitar la comunicación con vistas a potenciar la colaboración entre ellos.

La misma integra diversos grupos de investigación como :

- Estación Biológica de Doñana (Departamento de Ecología Evolutiva)
- Instituto de Astrofísica de Canarias (Oficina Técnica de Protección del Cielo)
- Observatorio Astronómico Nacional (Grupo de estudio de contaminación electromagnética)
- Observatorio de Calar Alto (Grupo de estudio de calidad astronómica del cielo)
- Parc Astronòmic Montsec (Grupo de protección del cielo)
- Planetario de Pamplona (Grupo de trabajo sobre Contaminación Lumínica)
- Universidad Complutense de Madrid (Grupo de Astrofísica Extragaláctica e Instrumentación Astronómica)
- Universitat Politècnica de Catalunya (Equipo de Estudios Luminotécnicos del Depto. de Proyectos de Ingeniería)
- Universidade de Santiago de Compostela (Grupo de Microóptica y Sensores de Frente de Ondas)
- Universitat de València (Grupo de trabajo para el estudio de la contaminación lumínica)
- Universidad de Murcia (Laboratorio de Cronobiología de la Universidad de Murcia)
- Universidad Rovira i Virgili (Grupo de Luminotecnia)
- Universitat de Barcelona (Astronomía y meteorología)

Para cumplir sus objetivos se solicitó ayuda para financiar encuentros y reuniones de presentación de resultados y puesta en común de métodos y también para el intercambio de investigadores.

El objetivo principal de la red consiste en vertebrar una red temática que reúna a los investigadores que estudian la contaminación lumínica en España. A continuación se desglosan las tareas que se prevé realizar:

1. Catalogación de los grupos de investigación nacionales dedicados al estudio de la contaminación lumínica en todas las áreas de conocimiento.
2. Reunión de los investigadores para la puesta en marcha de la red.
3. Creación de un foro de discusión científica y técnica.
4. Identificación de campos de colaboración y establecimiento de colaboraciones multidisciplinares entre grupos de diferentes áreas.
5. Elaboración de mapas de brillo de fondo de cielo en zonas particularmente interesantes.
6. Divulgación y difusión de resultados.
7. Definición de las tareas pendientes y nombramiento de los responsables de las mismas.

#### 4.6.- Light Pollution Science and Technology Institute

(ISTIL- Istituto di Scienza e Tecnologia dell'Inquinamento Luminoso)



El ISTIL es, como su nombre indica, un instituto de la ciencia y tecnología de la contaminación lumínica. Se creó como una organización sin ánimo de lucro con el objetivo de desarrollar y promover la investigación científica sobre la contaminación lumínica y el desarrollo y la difusión de tecnologías y métodos para limitar la contaminación lumínica y sus efectos adversos sobre el medio ambiente por la noche.

Su presidente, Pierantonio Cinzano, es una referencia internacional en el contexto de la contaminación lumínica y sus trabajos aparecen en la mayoría de las referencias de otros trabajos y estudios.

Entre sus actividades se encuentran proyectos, estudios sobre el contexto, publicaciones y trabajos así como desarrollos y propuestas de instrumentos para la medición y evaluación de la contaminación lumínica.

#### 4.7.- Iniciativa Starlight



La iniciativa Starlight ( La luz de las estrellas (Iniciativa Starlight, 2007) ha sido uno de los foros de referencia internacional en la defensa del medio nocturno. Esta iniciativa estuvo impulsada por el IAC y la UNESCO.

Se concibió como “una campaña internacional en defensa de la calidad de los cielos nocturnos y el derecho general a la observación de la estrellas, abierta a la participación de

todas las instituciones y asociaciones científicas, culturales y ciudadanas relacionadas con la defensa del firmamento. Se pretende así reforzar la importancia que los cielos nocturno limpios tienen para la humanidad, realzando y dando a conocer el valor que este patrimonio en peligro posee para la ciencia, la educación, la cultura, el medio ambiente, el turismo, y evidentemente, como factor calidad de vida. Un importante aspecto de la iniciativa es ayudar a difundir los beneficios directos e indirectos, tecnológicos, económicos o culturales, asociados a la observación de las estrellas.” (Iniciativa Starlight, 2007)

Fué lanzada en 2007 a propuesta del IAC (Instituto de Astrofísica de Canarias) en asociación con la UNESCO y otros organismos internacionales como UAI (Unión Astronómica Internacional), UNWTO (Organización Mundial del Turismo o el Secretariado de la Convención Ramsar (1971).

El Centro UNESCO de Canarias colabora con la iniciativa mundial en en Defensa de la Calidad del Cielo Nocturno como Derecho Científico, Cultural y Medioambiental de la Humanidad. La Iniciativa ha sido promovida por la Reserva de Biosfera de La Palma, el Instituto Astrofísico de Canarias, el Gobierno de Canarias, el Ministerio de Medio Ambiente, el Programa MaB y la UNESCO.

En el marco de esta Iniciativa se celebró en la Isla de La Palma la Conferencia Mundial Starlight2007, teniendo como uno de sus grandes logros la Declaración Mundial del Derecho a la Luz de las Estrellas.

Desde sus inicios a la actualidad este movimiento ha sufrido diversos cambios y facetas en su presentación, en particular en la web. Actualmente la web “Fundación Starlight” (Fundación StarLight, 2009) indica que *“la Fundación Starlight se creó en el año 2009, tras la “I Conferencia Internacional Starlight”. Se dispone así, desde entonces, de una entidad con personalidad jurídica propia, cuyo objetivo general es la difusión de la astronomía y la coordinación, gestión e impulso de los principios y filosofía del movimiento Starlight, desarrollando en la práctica todas sus posibles dimensiones para extenderlas por todo el mundo mediante actividades, productos y servicios en estas materias.”* Así mismo aclara que las diferentes maneras de referirse a “Starlight” (“Universo Starlight”, “Iniciativa Starlight” y/o “Fundación Starlight”) son términos que describen facetas de dicho movimiento y maneras de trabajar por sus objetivos.

## 4.8.- El Programa Europeo Greenlight. Una iniciativa promovida por la Comisión Europea

El Programa Greenlight es una iniciativa voluntaria para la lucha contra la contaminación, que tiene como objetivo que los consumidores de electricidad del sector no residencial (tanto públicos como privados), denominados Socios, se comprometan con la Comisión Europea a instalar en sus edificios la tecnología en iluminación más eficiente posible, siempre que (1) esto sea posible y (2) la calidad de la iluminación se mantenga o mejore. Greenlight fue puesto en marcha en febrero de 2000 por la Dirección General de Energía y Transporte de la Comisión Europea.

El objetivo del Programa GreenLight es reducir el consumo de energía en iluminación interior y en alumbrado público a lo largo de toda Europa, para conseguir reducir el nivel de contaminación y limitar el calentamiento global. También se busca mejorar la calidad de las condiciones visuales a la vez que se ahorra dinero.

La parte fundamental del Programa es el documento de adhesión al mismo, firmado entre el Socio y la Comisión, en el que el Socio se compromete a:

Para espacios existentes: bien mejorar al menos el 50% de todos los espacios elegibles que sean propiedad del socio o que tenga en alquiler a largo plazo, o bien reducir el consumo total de energía en iluminación en al menos un 30%. Los espacios elegibles son aquellos en los que la iluminación se puede mejorar.

Para espacios nuevos: elegir las nuevas instalaciones de modo que no haya una alternativa que mantenga o mejore la calidad de la iluminación aportada por la instalación elegida ni que consuma menos electricidad a cambio de una inversión suplementaria que pueda resultar rentable.

Además, el socio deberá realizar las mejoras en los 5 años posteriores a la firma de la adhesión al programa, enviando un informe de progreso cada año y nombrando un responsable del programa dentro de la empresa, que asegure el cumplimiento del mismo.

El programa es totalmente voluntario, por lo que las entidades adheridas son totalmente libres de dejarlo si así lo desearan. Si un socio no puede cubrir los requerimientos mínimos del porcentaje de espacios a mejorar o de ahorro del gasto energético en iluminación, puede dejar el programa sin ningún tipo de perjuicio para volver a retomarlo cuando cambiase su situación.

Los profesionales de la iluminación que estén interesados en promover GreenLight y en dar asistencia técnica a los socios, están invitados a adherirse al mismo en calidad de Promotores de GreenLight. A cambio, los promotores recibirán el reconocimiento público por sus esfuerzos en promover el programa GreenLight. El modo de convertirse en Promotor del Programa GreenLight es, al igual que para ser socio, a través de la firma de un contrato de adhesión al mismo.

#### **4.9.- Estudio científico sobre la contaminación lumínica en la Universidad Complutense**



Investigadores del Departamento de Astrofísica y Ciencias de la Atmósfera de la Facultad de Físicas han realizado estudios para medir este tipo de contaminación en España, pero también en la Universidad Complutense.

Este estudio ha realizado medidas exhaustivas en diferentes puntos de la Universidad Complutense de Madrid y ha elaborado un informe y recomendaciones sobre la iluminación del campus. (Astrofísica\_UCM.)

Así mismo, este grupo de investigadores ha mostrado su apoyo a la Iniciativa Starlight.

#### **4.10.- Espacio Natural de Doñana**

A comienzos de 2010 el Espacio Natural de Doñana estrenó el primer sistema desarrollado en Europa para el seguimiento de la contaminación lumínica. Este sistema ha sido impulsado por la Infraestructura Científica y Tecnológica Singular (ITCS) desplegada por la Estación Biológica de Doñana (EBD), dependiente del Centro Superior de investigaciones Científicas (CSIC). El dispositivo, diseñado por el astrónomo del Observatorio Astronómico de Calar Alto (Almería) y presidente de la empresa tecnológica ITEC Astronómica, Jesús Aceituno, se basa en una lente de ojo de pez y en un conjunto de filtros y elementos electrónicos de alta sensibilidad que registran el impacto lumínico en la bóveda celeste en el periodo de tiempo requerido.

Con la ayuda de un complejo programa informático, este sistema, denominado Astmon, fué el primero en su género que cataloga la intensidad y características de la contaminación lumínica. Tras su implantación en Doñana, se pretendía su despliegue en otros recintos científicos y observatorios astronómicos españoles para el seguimiento de la calidad de la visión nocturna.

Las mayores fuentes de contaminación lumínica que padece el Espacio Natural de Doñana -integrado por las más de 100.000 hectáreas que suman los parques nacional y natural del mismo nombre- son las emisiones de luz del enclave turístico de Matalascañas y de la aldea de El Rocío, colindantes a este espacio protegido. También se nota el halo lumínico procedente de las áreas metropolitanas de Sevilla, Huelva y Jerez de la Frontera (Cádiz), distantes unos 50 kilómetros.

A día de hoy, en el espacio natural de Doñana se han realizado diversos estudios de contaminación lumínica entre los que destacan los proyectos:

“Medición y análisis de la contaminación lumínica en el Espacio Natural de Doñana”, bajo la dirección del investigador principal D. Francisco Cordero Cuenca.

“Medición contaminación lumínica Doñana”, bajo la dirección del investigador principal D. Javier Pedraza Torres, con la financiación de la Agencia de Medio Ambiente y Agua de la Junta de Andalucía.

#### **4.11.- Proyecto 21.69 Consultoría Lumínica**

El proyecto 21.69 fué una iniciativa de la empresa Consultoría Lumínica (Consultoría lumínica), que, de forma pionera en el mercado, según su propia web, elabora mapas sobre contaminación lumínica, habiendo comenzado con el de la ciudad de Vitoria-Gasteiz. De este modo se permite la visualización del impacto que la contaminación lumínica ha desarrollado en los municipios. Este proceso lo desarrolló con equipos de alta tecnología, utilizada y recomendada por el observatorio astronómico de Canarias.

Dichos equipos se han instalado en las unidades móviles que se emplean para la realización de las auditorías energéticas de alumbrado público y se han conectado al novedoso sistema informático SAGAP (software auditor y gestor del alumbrado público), que tras procesar las magnitudes obtenidas, elabora un mapa en el cual podemos contrastar las diferentes zonas del municipio en función del grado de contaminación lumínica.

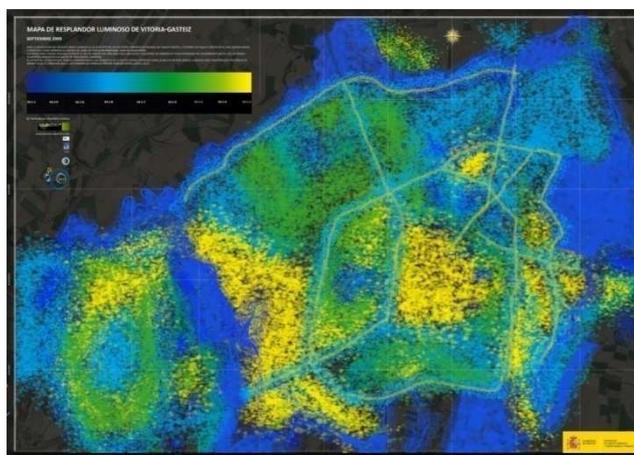
La unidad móvil recorre la ciudad de día, identificando tipos de vía, densidad de tráfico, tipo de calzada, tipo de luminaria, estado de luminarias, etc... Y de noche, midiendo los niveles de iluminación, niveles de uniformidad, niveles de luz emitidos hacia el hemisferio superior, luz intrusa doméstica, etc...

Además de todo esto, la unidad móvil recorre la ciudad de noche tomando las mediciones de magnitud necesarias para la realización del mapa de contaminación lumínica.

Todos los datos recogidos por la unidad móvil junto con los datos recogidos por los equipos de inspección física, son analizados por el equipo auditor que establece las medidas correctoras oportunas.

Durante el proceso de realización de una auditoría energética de alumbrado público detectaron los niveles excesivos de iluminación, contrastándolos con el Reglamento de Eficiencia Energética en Instalaciones de Alumbrado Exterior RD 1890-2009 y con la norma UNE 13201 sobre Iluminación de Carreteras. De igual manera contrastaron las luminarias que emiten contaminación lumínica hacia el hemisferio superior con la directiva 2005/32/CE sobre Requisitos de Diseño Ecológico.

Para la realización del mapa de contaminación lumínica se establece un valor patrón, por el que por encima hay derroche energético contrastado. Tal y como se puede observar en el Mapa de Contaminación Lumínica, en las zonas que están coloreadas por encima del valor patrón hay que tomar medidas de mitigación de la contaminación lumínica y por lo tanto de ahorro y eficiencia energética.



**Figura 33 Mapa lumínico de Vitoria (Proyecto 21.69 Consultoría Lumínica)**

El equipo de Consultoría Lumínica se desplazó al Astrofísico de Canarias y tomó la medida del brillo del cielo, obteniendo la magnitud 21,69 SQM mag/arcsec<sup>2</sup> tomando de ésta la magnitud ideal de referencia y el nombre del proyecto.

También se tomaron algunos puntos de referencia en la ciudad de Santa Cruz de La Palma, dando unas magnitudes de 19 en el SQM de media. Es por ello, que La Palma es, a nuestro entender, el mejor punto de referencia, o uno de ellos, de España.

#### **4.12.- Estudio Sobre Contaminación Lumínica en el Parque Natural del Delta del Ebro**

Este estudio se corresponde con un trabajo realizado por miembros del Departamento de Estudios Luminotécnicos de la Universidad Politécnica de Cataluña (Solano Lamphar, San Martín Páramo, & García Gil, Estudio Sobre Contaminación Lumínica en el Parque Natural del Delta del Ebro, 2009). Su interés como referencia, entre otros, radica en responder a un estudio realizado bajo la perspectiva de las afectaciones biológicas de la contaminación lumínica, a diferencia de lo que habitualmente se viene haciendo en el contexto astronómico o en el energético.

Así, los objetivos planteados por este estudio han sido:

- Medir y cualificar las condiciones lumínicas del Parque Natural del Delta del Ebro.
- Estudiar las influencias que pueden determinar variaciones en las mismas.
- Relacionar estos datos con las posibles afectaciones a la población biológica de la zona.

Según sus investigadores, los factores lumínicos que pueden definir las condiciones nocturnas son:

- Luminancia del fondo de cielo.
- Iluminancia en el terreno.
- Iluminancia en planos verticales.
- Existencia de luminancias puntuales o sectoriales muy elevadas en el horizonte.

Y estos factores pueden afectar a:

- Relación presas-predadores.
- Localización de alimentos.
- Comportamiento reproductivo.
- Desorientación.
- Efecto barrera.

---

Las condiciones lumínicas dependerán de:

- Condiciones de iluminación en el entorno.
- Contaminación atmosférica.
- Fases lunares.
- Meteorología.

En este estudio se encontró que los factores lumínicos que definían las condiciones nocturnas fueron: la luminancia del fondo de cielo, la iluminancia en el terreno, y la existencia de luminancias puntuales o sectoriales muy elevadas en el horizonte. Así también, después de llevar a cabo el tratamiento de los datos, se determinó que las condiciones lumínicas dependían de las condiciones de iluminación en el entorno, características e índice de emisión lumínica de los focos contaminantes, distancia desde el foco al área de estudio y la extinción atmosférica al momento de la medición.

Un hecho relevante que también se concluyó de este estudio fue que la correlación que se hizo entre los datos que arrojaron los dos instrumentos utilizados (luminancímetro y SQM), sirvió para afirmar que los datos de los dos instrumentos presentaban características similares. Por lo tanto, se concluyó que la elección de su utilización fue adecuada.

---

# Capítulo 5.- Medida y evaluación de la contaminación lumínica en entornos urbanos.

---

## 5.1.- Introducción

El concepto de contaminación lumínica aplicado a entornos urbanos tiene diferentes connotaciones a la hora de su definición y de su evaluación.

Como se ha expuesto en capítulos anteriores, por una parte, el entorno urbano es una de las principales fuentes u origen de la contaminación lumínica que afecta a otros entornos (astronómico, biológico, ...). Por otra parte el propio contexto urbano es receptor de los efectos de la contaminación lumínica que él mismo provoca.

Una tercera consideración que se puede hacer es la de que la contaminación lumínica del entorno urbano procede en su mayoría del uso y consumo de fuentes de energía (generalmente eléctricas) que, a su vez, son origen de otros tipos de contaminación (medio ambiente, CO<sub>2</sub>, ...).

Finalmente, se debe también tener en cuenta que gran parte de las normativas que se han elaborado para regular los efectos de la contaminación lumínica han sido incorporadas o incluidas en el contexto de las normativas que regulan la eficiencia energética y el alumbrado público. En su origen, estas normativas de eficiencia energética, tienen por objeto garantizar la adecuada iluminación para la que se concibió la instalación y, simultáneamente, minimizar los efectos perjudiciales tanto económicos como medioambientales (eficiencia).

Cuando se plantea un concepto de eficiencia o similar, se viene a medir la relación entre la energía (por ejemplo) aprovechada en el objeto de la instalación y la energía total consumida. Una eficiencia del 100% implicaría que toda la energía utilizada se aprovecha en el objeto final, lo cuál sería la situación ideal. El problema, en particular al hablar de contaminación, no surge tanto a la hora de realizar la medida de la energía utilizada o

consumida sino a la hora de evaluar, y quizás previamente definir, el concepto de energía aprovechada o necesaria para la función de la instalación.

## 5.2.- Normativas.

Si bien en el capítulo 2 se ha presentado un panorama de la normativa relacionada y su implicación, en este apartado se pretende extraer de la misma la idea de que tanto las mediciones a realizar como los instrumentos implicados están orientados al contexto energético y al aprovechamiento del alumbrado bajo la perspectiva de la visión humana, lo que en principio es coherente. Sin embargo, bajo el contexto de los efectos de la contaminación lumínica, no siempre la visión humana debe ser el referente. En este sentido, contextos como el astronómico o el medio ambiental (animales y plantas) no siempre tienen su centro de atención en la respuesta del ojo humano.

A nivel nacional la normativas más relacionadas con el alumbrado público es el 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.

A nivel autonómico, como se ha desarrollado en capítulos anteriores, en Andalucía cabe mencionar la Ley 7/2007, de 9 de julio, de Gestión Integrada de la Calidad Ambiental, que regula por vez primera en Andalucía la contaminación lumínica, y el Decreto 357/2010, de 3 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento para la Protección de la Calidad del Cielo Nocturno frente a la contaminación lumínica y el establecimiento de medidas de ahorro y eficiencia energética.

Un denominador común en lo relativo a los métodos de evaluación y medición de los parámetros son las Instrucciones Técnicas Complementarias donde se desarrollan los procedimientos de medidas e instrumentos a utilizar.

Una de las características comunes tanto de las mediciones relacionadas como de los instrumentos especificados para dichas mediciones es que se relacionan con la curva fotópica de visión humana, lo cual es del todo entendible ya que el objeto principal del alumbrado público es la posibilitación de la visión humana durante la noche. Cabe pues entender que

toda energía aplicada fuera de este objetivo es desaprovechada. Desde un punto de vista de eficiencia energética esta consideración puede aceptarse como correcta. Sin embargo, si hablamos de medir contaminación lumínica, hay longitudes de onda fuera de la curva fotópica mencionada que ocasionan perjuicios en otros entornos como el astronómico o el ambiental.

La respuesta fotópica del ser humano no es la misma que la de otros seres vivos. Los espectros estudiados en el ámbito de la astronomía no se ciñen sólo a los de la visión humana. Consecuentemente regular y realizar las mediciones con instrumentos cuya respuesta está condicionada a la respuesta fotópica del ojo humano puede no ser acertado a la hora de evaluar la contaminación lumínica y sus posibles efectos.

### 5.3.- Instrumentación.

Como se ha constatado en capítulos anteriores existe una diversidad de instrumentos y propuestas orientados a la medida de la contaminación lumínica. Esta diversidad no obedece exclusivamente a diferencias de tecnologías empleadas sino, básicamente, a la adaptación de los efectos que se desean medir en el contexto donde se requiere la medición. Así, los contextos astronómicos disponen y proponen herramientas de medida generalmente asociadas a los espectros y muchas de ellas incluyen filtros como las cámaras específicas o dispositivos de medición con ruedas de filtros. En otros casos, como el SQM mencionado, su respuesta es fotópica llegándose incluso a equiparar al uso de un luminómetro. En el contexto medioambiental las particularizaciones pueden ser mucho más amplias dado que los efectos producidos por la contaminación lumínica pueden ser muy diversos. En este sentido, la respuesta al espectro luminoso puede ser muy diferente en animales y plantas así como los efectos que la iluminación nocturna puede producir. Finalmente, en nuestro caso, en el contexto urbano es donde se centrará fundamentalmente este estudio.

#### 5.4.- Contexto urbano. Alumbrado. Eficiencia energética.

Como acabamos de mencionar, las normativas actuales, si bien ya empiezan a contemplar el concepto de contaminación lumínica, centran gran parte de este concepto en el ámbito de la eficiencia energética. Aceptando el alumbrado nocturno como una necesidad de la sociedad y de su avance, se partirá de la definición de contaminación lumínica como “la emisión de flujo luminoso por fuentes artificiales de luz constituyentes del alumbrado nocturno, con intensidades, direcciones o rangos espectrales **inadecuados para la realización de las actividades previstas en la zona alumbrada**”.

La principal consecuencia de esta definición resulta en la utilización y/o recomendación de instrumentos de medida basados en la respuesta fotópica de la visión humana que no siempre serán adecuados para la evaluación de la contaminación lumínica.

En su base, las normativas relativas al alumbrado han ido dirigidas a garantizar niveles de iluminación adecuados para la función de la instalación. En este sentido se debe garantizar esta función que puede ir desde la adecuada visión por parte del usuario, en particular en la circulación de vehículos, hasta cuestiones de seguridad, publicidad, información, ocio, etc...

Cuando se incorpora la contaminación lumínica en estas normativas básicamente se observa que a lo que inicialmente era garantizar los niveles mínimos y de seguridad requeridos, se añaden niveles máximos y algunas cuestiones de direcciones como el FHS o Flujo Hemisférico Superior así como la consideración de cuestiones de rendimiento y eficiencia energética. Todo ello añadido a cuestiones de zonificación y limitación horaria.

#### 5.5.- Justificación

A la vista de las numerosas propuestas de instrumentos y técnicas de medición de la contaminación lumínica (o contaminaciones lumínicas) en esta parte de la tesis se ha querido realizar alguna aportación en esta línea y que contribuya al actual proceso de definición y medidas y evaluación de la contaminación lumínica en distintos contextos.

En el ámbito de la astronomía es donde otros han desarrollado más trabajos al respecto. Este contexto se encuentra condicionado por cuestiones particulares y diversas como

espectros específicos o entornos determinados (observatorios, zonas protegidas, ...). En el ámbito medioambiental, ante la diversidad de contextos particulares bajo los que se presentan los efectos de la contaminación lumínica y el recorrido que aún queda por realizar en cuanto al estudio de sus efectos sobre ecosistemas o entornos específicos, no se presume una herramienta genérica de medición y evaluación de la contaminación lumínica.

En el ámbito urbano si se han encontrado elementos comunes en los que, unido a las líneas de trabajo de las áreas implicadas en esta Tesis, en particular la del Área de Proyectos de Ingeniería del Departamento de Expresión Gráfica, Diseño y Proyectos, se ha estimado que se puede realizar dicha aportación.

En este sentido, por resumir una justificación general, al margen de otras consideraciones establecidas en el resto del trabajo de esta tesis, se ha observado que las Instrucciones Técnicas Complementarias que establecen las mediciones técnicas a realizar, en particular la ITC-2 y la ITC-3, utilizan, entre otras mediciones y casos, tablas de valores máximos a no superar y, básicamente establecen el luxómetro y el luminancímetro clásicos como instrumentos de medida. En particular el luminancímetro es un instrumento caro y no habitual dada su aplicación a un entorno muy específico. Por otra parte, pese a ser el recomendado por la normativa, planteamos su no idoneidad para determinados casos. Cuestiones como su medición puntual (estrecho ángulo de medida), su respuesta fotópica, así como otras cuestiones que se plantean en este trabajo, nos han permitido poner en cuestión esta idoneidad y plantearnos el estudio de alternativas.

Plantear valores máximos de una escena y utilizar un luminancímetro clásico con una medida puntual estrecha resulta muy ineficiente. Para localizar el máximo de la escena se requiere establecer un barrido sobre todos los puntos de la misma. En este sentido la normativa prevé la utilización de mallas sobre las que realizar las mediciones. Si las mallas son amplias, no se garantiza que los valores máximos se encuentren en los puntos medidos. Si las mallas son estrechas, el número de mediciones a realizar resulta excesivo. Por otra parte, y a fin de cuentas, una medida de los puntos de una malla resultaría equivalente a una fotografía en la que los píxeles serían los puntos de medida de la trama. En consecuencia, una fotografía, si se puede extraer de ella información de valores lumínicos de sus píxeles, se convierte en la mejor alternativa. Una medida de una malla de 20 x 30 puntos de una escena requiere la toma

de 600 mediciones consecutivas con un luminómetro. A esta situación se añaden factores de errores como que entre la primera y la última existirá sin duda un gran retraso temporal que puede no responder a unas mismas condiciones para todos los puntos. Así mismo, si dichas mediciones han de realizarse manualmente el factor de error humano es elevado. Igualmente, como se ha dicho, no existe garantía de que el máximo buscado se encuentre en uno de los 600 puntos evaluados y no haya caído en los tramos no medidos. En este sentido las precisiones requeridas al instrumento perderían su sentido.

Existen luminómetros llamados integradores que realizan la medida de valores medios en áreas determinadas. Sin embargo, esta integración de valores medios imposibilita la determinación de valores máximos requeridos por la normativa antes mencionada. Estos luminómetros integradores resultan de utilidad para otros fines como, por ejemplo, evaluar la luminosidad media en un túnel o zonas iluminadas.

El planteamiento de la fotografía digital como alternativa a los casos mencionados resulta idóneo en lo que podemos resumir como:

- Una fotografía digital es una malla de miles de píxeles.
- La medición sobre los mismos se realiza en el mismo instante.
- La información digital que contienen puede ser procesada pudiendo obtenerse valores máximos, mínimos, medios así como cualquier otro proceso.
- Así mismo el registro y almacenamiento de resultados permite su incorporación a ficheros, bases de datos, documentos, informes, impresión en papel, etc... sin intervención humana (en el sentido de manipulación de los datos).

Esta alternativa de la fotografía digital ya ha sido anticipada por otros autores e incluso por la propia administración que dicta las leyes aunque esta última aún lo deja como una posibilidad futura.

Gran parte de estas propuestas se basan en la utilización de cámaras digitales específicas o industriales que, al igual que el luminómetro, no están al alcance de cualquiera.

La cámara fotográfica DSLR o réflex a día de hoy no sólo está al alcance de cualquier profesional sino que sus bajos precios frente a sus elevadas prestaciones la convierten como una herramienta a considerar en nuestra aplicación. El avance de la tecnología digital en los últimos años ha permitido que estos dispositivos de uso doméstico hayan alcanzado prestaciones técnicas que hasta hace poco eran profesionales y a unos costes muy asequibles.

En consecuencia, en esta parte de esta tesis se ha realizado una propuesta del uso de las cámaras fotográficas comerciales DSLR como alternativa y/o soporte para la medición y evaluación de la contaminación lumínica, en particular para entornos urbanos.

### 5.6.- Instrumentación utilizada.

Para la realización de este trabajo se han requerido diversos recursos materiales, instrumentos y aparatos con y sobre los que realizar las mediciones y verificaciones sobre los conceptos teóricos propuestos.

En este apartado se presentan las herramientas y recursos más significativos utilizados para el desarrollo de este trabajo.

Para la realización de las pruebas de banco y toma de datos se han utilizado una serie de equipos e instrumentos de los que cabe reseñar los siguientes:

- Cámara de fotografía Pentax K-x.



**Figura 34 Pentax Kx**

Especificaciones del fabricante:

## Pentax K-x

### Specifications



Brand:	<b>Pentax</b>
Model:	<b>K-x</b>
MegaPixels:	<b>12.40</b>
Sensor:	<b>23.6 x 15.8 mm</b>

### Sensor INFO

**Pentax K-x** comes with a 23.6 x 15.8 mm CMOS sensor, which has a diagonal of 28.40 mm (1.12 inch) and a surface area of 372.88 mm<sup>2</sup>.

Diagonal	Surface area	Pixel pitch	Pixel area	Pixel density
<b>28.40 mm</b>	<b>372.9 mm<sup>2</sup></b>	<b>5.49 μm</b>	<b>30.14 μm<sup>2</sup></b>	<b>3.32 MP/cm<sup>2</sup></b>

The sensor has a surface area of **372.9 mm<sup>2</sup>**. There are approx. 12,400,000 photosites (pixels) on this area. Pixel pitch, which is a measure of the distance between pixels, is **5.49 μm**. Pixel pitch tells you the distance from the center of one pixel (photosite) to the center of the next.

Pixel or photosite area is **30.14 μm<sup>2</sup>**. The larger the photosite, the more light it can capture and the more information can be recorded.

Pixel density tells you how many million pixels fit or would fit in one square cm of the sensor. Pentax K-x has a pixel density of **3.32 MP/cm<sup>2</sup>**.

These numbers are important in terms of assessing the overall quality of a digital camera. Generally, the bigger the sensor, pixel pitch and photosite area, and the smaller the pixel density, the better the camera.

### Specifications

Brand	Pentax
Model	K-x
Effective megapixels	12.40
Total megapixels	12.90
Sensor size	23.6 x 15.8 mm
Sensor type	CMOS
Sensor resolution	4299 x 2885
Max. resolution	4288 x 2428

Min. resolution 1728 x 1152  
 Crop factor 1.52  
 Optical zoom n/a  
 Digital zoom No  
 ISO Auto, 100 - 12800  
 Auto focus Yes  
 Manual focus Yes  
 Normal focus range n/a  
 Macro focus range n/a  
 Focal length (35mm equiv.) n/a  
 Aperture priority Yes  
 Aperture n/a  
 Aperture (35mm equiv.) n/a  
 Metering Centre weighted, Multi-segment, Spot  
 Exposure Compensation -3EV - +3EV with 1/2 or 1/3EV st  
 Shutter priority Yes  
 Min. shutter speed 30 sec  
 Max. shutter speed 1/6000 sec  
 Flash modes Anti red-eye, Auto, Fill in, Off, Slow flash  
 Built-in flash Yes  
 External flash Yes  
 Viewfinder Optical (pentamirror)  
 White balance presets 9  
 LCD display Yes  
 LCD size 2.7"  
 LCD resolution 230,000  
 Selftimer Yes  
 Storage types SDHC, Secure Digital  
 USB USB 2.0 (480 Mbit/sec)  
 Batteries 4 x AA batteries (Lithium, Alkaline or Ni-MH)  
 Weight 515g  
 Dimensions 122.5x91.5x67 mm  
 Year 2009

- Objetivos:



**Figura 35** Objetivo Samyang, Fish Eye CS lens. Multicoated 8mm. F3.5



**Figura 36** Objetivo Pentax, smc DAL, 18-55mm 1:3,5-5,6 AL

- Luminancímetro Minolta Konica LS-110



Figura 37 Luminancímetro LS 110 Minolta

El luminancímetro LS-110 es un clásico en la medición de luminancia y es el utilizado en casi todos los trabajos consultados. Tiene una precisión de  $\pm 2\%$   $\pm 2$  dígitos del valor mostrado para el rango de 0,01 a 9,99 cd/m<sup>2</sup> y de  $\pm 2\%$   $\pm 1$  dígito del valor mostrado para el rango de 10,00 cd/m<sup>2</sup> o mayor, su ángulo de aceptación es de 1/3° y su rango de medición de 0,01 a 999.900 cd/m<sup>2</sup>.

Las características del fabricante son las siguientes:

ESPECIFICACIONES		
Modelo	Medidor de luminancia LS-100	Medidor de luminancia LS-110
Tipo	Medidor puntual SLR para medir luminancia de fuentes luminosas y de superficies reflectantes	
Ángulo de medición	1°	1/3°
Sistema óptico	Lente de 85 mm f2.8; sistema de visualización SLR; factor de destellos menor del 1,5%	
Ángulo de visión	9°	
Distancia de enfoque	1014 mm (40 pulg.) a infinito	
Mínima área de medición	Ø14,4 mm	Ø4,8 mm
Receptor	Fotocélula de silicio	
Respuesta espectral relativa	Dentro del 6% (f1) de la eficiencia luminosa espectral CIE V (λ)	
Tiempo de respuesta	FAST: Tiempo de muestreo: 0,1 seg, tiempo de visualización: 0,8 a 1,0 s. SLOW: Tiempo de muestreo: 0,4 seg, tiempo de visualización 1,4 a 1,6 s. cd/m <sup>2</sup> o fL. (conmutable)	
Unidades de luminancia	cd/m <sup>2</sup> o fL. (conmutable)	
Rango de medición	FAST: 0,001 a 299.900 cd/m <sup>2</sup> (0,001 a 87.530 fL.) SLOW: 0,001 a 49.990 cd/m <sup>2</sup> (0,001 a 14.590 fL.)	FAST: 0,01 a 999.900 cd/m <sup>2</sup> (0,01 a 291.800 fL.) SLOW: 0,01 a 499.900 cd/m <sup>2</sup> (0,01 a 145.900 fL.)
Precisión	0,001 a 9,99 cd/m <sup>2</sup> (o fL.): $\pm 2\%$ $\pm 2$ dígitos del valor mostrado 1,000 cd/m <sup>2</sup> (o fL.) o mayor: $\pm 2\%$ $\pm 1$ dígito del valor mostrado (Iluminante A medido a la temperatura ambiente de 20 a 30°C (68 a 86°F))	0,01 a 9,99 cd/m <sup>2</sup> (o fL.): $\pm 2\%$ $\pm 2$ dígitos del valor mostrado 10,00 cd/m <sup>2</sup> (o fL.) o mayor: $\pm 2\%$ $\pm 1$ dígito del valor mostrado
Repetitividad	0,001 a 9,99 cd/m <sup>2</sup> (o fL.): $\pm 0,2\%$ $\pm 2$ dígitos del valor mostrado 1,000 cd/m <sup>2</sup> (o fL.) o mayor: $\pm 0,2\%$ $\pm 1$ dígito del valor mostrado (Fuente luminosa medida: iluminante A)	0,01 a 9,99 cd/m <sup>2</sup> (o fL.): $\pm 0,2\%$ $\pm 2$ dígitos del valor mostrado 10,00 cd/m <sup>2</sup> (o fL.) o mayor: $\pm 0,2\%$ $\pm 1$ dígito del valor mostrado
Dispersión por temperatura/humedad	Dentro del $\pm 3\%$ $\pm 1$ dígito (del valor mostrado a 20°C / 68°F) dentro del rango de temperatura/humedad de operación	
Modo de calibración	Valor patrón Konica Minolta / Valor patrón establecido por el usuario (conmutable)	
Factor de corrección de color	Establecido por indicación numérica; rango: 0,001 a 9,999	
Luminancia de referencia	1; establecido por medición o por indicación numérica	
Modos de medición	Luminancia; cociente de luminancia; valor pico de luminancia o de cociente de luminancia	
Pantalla	Externa: LCD de cuatro dígitos con indicaciones adicionales Interna: LCD de cuatro dígitos con iluminación LED de fondo	
Comunicación de datos	RS-232C; velocidad en baudios: 4800 bps	
Control externo	El proceso de medición puede ser iniciado por un dispositivo externo conectado al terminal de salida de datos	
Fuente de alimentación	Una batería de 9 V; la alimentación también puede ser suministrada por el cable de comunicación LS-A15	
Consumo de energía	Mientras está presionado el botón de medición y está iluminada la pantalla del visor: 16 mA en promedio Mientras el instrumento está encendido y la pantalla del visor no está iluminada: 6 mA en promedio	
Rango de temperatura/humedad de operación	0 a 40°C, humedad relativa 85% o menor (a 35°C) sin condensación	
Rango de temperatura/humedad de almacenamiento	-20 a 55°C, humedad relativa 85% o menor (a 35°C) sin condensación	
Dimensiones	79 x 208 x 150 mm (3-1/8 x 8-3/16 x 5-7/8 pulg.)	
Peso	850 g (30 oz.) sin pila	
Accesorios estándar	Tapa del objetivo; tapa del ocular; filtro ND del ocular; batería de 9 V; estuche	

8% CIE (f1), nuevo JIS (1993)  
2% del JIS anterior

Las especificaciones están sujetas a cambios sin previo aviso.

Figura 38 Especificaciones luminancímetro LS 110

- Luxómetro digital Panter LM-20



**Figura 39 Luxómetro LM-20**

El luxómetro LM-20 se ha utilizado en mediciones de comprobación y verificaciones de relexiones y luminosidad de superficies.

Las características del fabricante son:

Display: 3 dígitos y medio, LCD con lectura máxima 1999
Indicación de sobre escala, "1" a la izquierda
Indicador B de batería baja
Vida de batería: sobre 200 horas
Rangos: 0 – 200, 2000, 20.000 (indicación x10) lux
Precisión: +/- 4% rango, +/- 0,5% de fondo de escala para rangos 200 y 2000. +/- 7% rango, +/- 1% del fondo de escala para rango 20.000 (calibrado)
Característica de temperatura: +/- 0,1% °C
Repetibilidad: +/- 2%
Ángulo de incidencia: 30° en +/- 2%, 60° en +/- 7% y 80° en +/- 25%
Fotosensor: célula de selenio herméticamente sellada
Temperatura/humedad de funcionamiento: 0-40° / <85% RH
Salida registrada: DC 20mV fondo de escala
Longitud frontal fotosensor: sobre 1,5m
Alimentación: DC 9V
Dimensiones/peso unidad principal: 119Hx64Wx26D mm / 145g
Dimensiones/peso fotosensor: 125Hx66Wx36D mm / 100g
Accesorios: manual, tapa sensor, funda.

**Tabla 3 Características LM-20**

- Fotómetro medidor de exposición POLARIS SPD100



Figura 40 Polaris SPD100

Al igual que el luxómetro, el fotómetro POLARIS SPD100 se ha utilizado en mediciones de comprobación y verificaciones de reflexiones y luminosidad de superficies.

Sus especificaciones de fabricante son:

**Especificaciones:**

Tipo:	Exposímetro de mano para medir la exposición de luz ambiental y de flash
Medición:	Medición de luz incidente y reflejada Medición de luz ambiental y de flash
Sensor:	Fotodiodo de silicio
Ángulo de aceptación:	35 grados en la medición de luz reflejada
Modos de medición:	Luz ambiental, luz ambiental/EV, flash inalámbrico y flash con cable
Margen de medición:	Luz ambiental: EV 1 a 19.9 (ISO/100) en incrementos de 1/10 Flash: f/2 a f/90.9 (ISO/100) en incrementos de 1/10
Margen de números f:	f/0.5 a f/90 en incrementos de 1/10
Margen de velocidades de obturación:	Luz ambiental: 60 a 1/8000 seg. con velocidades extra de 1/25, 1/50, 1/75, 1/80, 1/90, 1/100, 1/200, y 1/400 seg. Flash: la 1/500 seg. con velocidades extra de 1/25, 1/50, 1/75, 1/80, 1/90, 1/100, 1/200, y 1/400 seg.
Margen de sensibilidades de película:	ISO 3 a 8000 en incrementos de 1/3
Margen de destello múltiple:	2 a 9 destellos
Tiempo de preparación del flash:	5 minutos
Memoria:	Almacenamiento de los modos de medición, sensibilidad de la película ISO, y velocidad de obturación
Nivel de programa:	Posibilidad de ajustar números f entre +0,9 a -0,9 como máximo con una sencilla operación de botones
Fuente de alimentación:	Una pila de 1.5 V, tamaño AA
Dimensiones:	119 × 63 × 21mm
Peso (sin pila):	93 g

Las especificaciones están sujetas a cambio sin previo aviso.

Figura 41 Especificaciones Polaris SPD100

- Banco de estudio para fotografía

Para trabajar sobre una instalación fija que no variara durante el tiempo que duraron las pruebas se ha dispuesto de un banco de estudio para fotografía de la casa Laik que sobre una base tiene dos brazos laterales con múltiples puntos de ajuste y sendas barras sobre las que se fijan los focos de alumbrado. Estos se pueden desplazar y girar para conseguir la configuración deseada. En otro eje centrado en uno de los laterales dispone de un eje con articulación para la fijación de la cámara. En nuestro caso, cuando se han requerido distancias mayores, se ha situado la cámara sobre trípode independiente. Las articulaciones de los brazos permiten un uso tanto vertical como horizontal de los patrones.



**Figura 42 Banco de fotografía LAIK**

- Patrones de escalas de luminosidad

Para los patrones de medida se han utilizado básicamente tres tipos de plantillas:

- Plantilla con 8 tonalidades de gris desde el blanco (255) hasta el negro (0) diseñada y realizada expresamente. Para su construcción simplemente se rellenaron los respectivos rectángulos de píxeles fijos RGB, desde el 000000 hasta el FFFFFFFF, haciendo una distribución intermedia ponderada. Aunque a la hora de imprimirlo no había garantía de obtener una plantilla que garantizara y reprodujera índices de reflexiones estándares, en nuestro caso no era significativo puesto que lo que se iba a proceder era a comparar mediciones hechas con el luminancímetro con las obtenidas con la cámara. En todo caso se obtuvo una distribución de los histogramas bastante adecuada.



**Figura 43 Plantilla de tonos grises**

- X-rite colorchecker passport card. Este conjunto de plantillas de colores y grises calibrados de la casa X-rite se utiliza en fotografía para el calibrado de colores y grises y la creación de perfiles de cámaras. Una de las plantillas disponibles es la clásica 18%. Inicialmente se utilizó como plantilla calibrada aunque al disponer posteriormente de otra plantilla Sekonic de mayores dimensiones y calibrada en fracciones y múltiplos de EV se optó por seguir con ésta última.



**Figura 44 X-rite colorchecker passport card**

- Plantilla Sekonic Exposure Target I - JQ-57. Si bien se han utilizado diversos patrones, principalmente en las pruebas y estudios previos, para la validación rigurosa de los resultados se ha utilizado un patrón calibrado de la casa Sekonic, modelo Sekonic Exposure Target I JQ-57. (Figura 45). Esta plantilla dispone de una cara con una escala de siete niveles de grises calibrados en incrementos de  $1/6$  EV más una franja de blanco (90,7 de reflexión) y otra de negro (3,6 de reflexión). La otra cara es una plantilla de gris del 18% de reflexión.

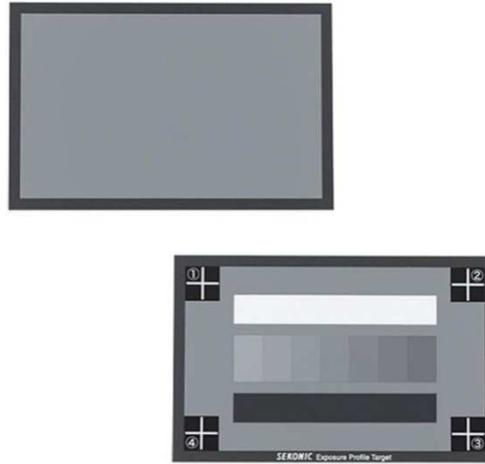


Figura 45 Sekonic Exposure Target I JQ-57

Especificaciones del fabricante:

**Sekonic Exposure Target I - JQ-57**

Item	Reflectance (%)	$\Delta EV$	L *	a *	b *	Density
1	90,7	2,33	96,3	-0,62	0,71	0,04
2	25,5	0,50	57,6	-0,54	0,64	0,59
3	22,7	0,33	54,9	-0,02	-0,32	0,64
4	20,2	0,17	52,3	-0,17	-0,41	0,69
5	18	0,00	49,7	0,03	-0,22	0,74
6	16	-0,17	47	-0,49	0,29	0,8
7	14,3	-0,33	44,7	-0,67	0,18	0,84
8	12,7	-0,50	42,3	-0,45	0,32	0,9
9	3,6	-2,33	22,3	-0,03	-0,71	1,44

(\*) Valores medidos con un Coloranalyzer C-2000S

Tabla 4 Características Sekonic Exposure Target I - JQ-57

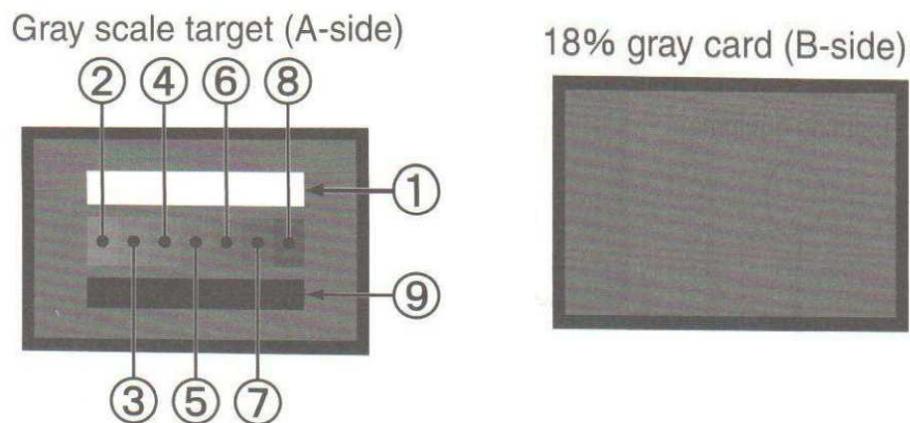


Figura 46 Puntos especificados Sekonic Exposure Target I JQ-57

La utilización de este patrón supuso por una parte dotar a las mediciones de un soporte profesional calibrado en fábrica y, por otra parte, disponer de una escala calibrada en EV lo que ayudó a la hora de determinar algoritmos de distribución ya que se disponía de la información de los incrementos de EV y sus códigos respectivos. Siendo una plantilla profesional tampoco había dependencia de errores de ninguna impresora o medio de reproducción.

- Medidor de calidad del cielo SQM.

Siendo uno de los instrumentos más clásicos en el entorno de la medición de contaminación lumínica en astronomía se ha dispuesto de un SQM para realizar mediciones y comparaciones con la utilización de cámaras fotográficas.

El modelo utilizado ha sido un SQM-LU que se debe conectar a un PC por USB para realizar la medición, bien con un software que viene con el instrumento, bien por puerto serie virtual que crea el interfaz USB.



**Figura 47 Sky Quality Meter (Fuente Unihedron)**

Las especificaciones del fabricante son:

### Specifications

USB connection	USB B connector (5m USB A to USB B cable supplied) USB FTDI VCP driver, serial port emulator at 115200baud.
Physical Size	3.6 x 2.6 x 1.1"
Meter precision	Each SQM-L is factory-calibrated. The absolute precision of each meter is believed to be $\pm 10\%$ ( $\pm 0.10$ mag/arcsec <sup>2</sup> ). The difference in zeropoint between each calibrated SQM-L is typically $\pm 10\%$ ( $\pm 0.10$ mag/sq arcsec)
Power requirement	18mA (from the 5V USB connection)
Operating temperature range	-40°C to 85°C
Temperature Accuracy	$\pm 2^\circ\text{C}$ maximum at 25°C
Temperature update rate	4.3 seconds, 256 samples taken at 60Hz then averaged.

**Figura 48 Especificaciones SQM LU**

Aunque, como se ha dicho, el driver del SQM crea un puerto serie virtual con el que se puede uno comunicar con él mediante un conjunto de comandos/respuestas detallado en el manual, también se dispone de un programa que permite configurar y leer los datos del SQM:



**Figura 49 Programa medición con SQM**

Este programa permite tanto realizar la configuración del instrumento como acceder a los datos leídos, incluida la temperatura, y registrar una captura programada periódicamente en un fichero de texto a modo de datalogger.

- Polímetro Fluke 8010A



**Figura 50 Polímetro Fluke 8010A**

Durante algunas mediciones se ha utilizado un polímetro con objeto de seguir las variaciones de la red de tensión con la que se alimentaban los focos. Aunque la luminancia se medía en el momento de captar las fotografías y por tanto tampoco era crítico que la tensión variara, y en consecuencia la luminosidad de los focos, ya que lo que se comparaban eran los datos leídos por el LS-110 y por la cámara. En todo caso se prestaba atención en que no hubieran grandes variaciones de tensión.

Así mismo se disponía de este instrumento a tenor de lo indicado por algunas de las normas y/o recomendaciones así como en algunos de los trabajos estudiados.

- Fuentes de luz

Las diversas mediciones se han realizado utilizando distintas fuentes de luz. Entre ellas, la principales han sido:

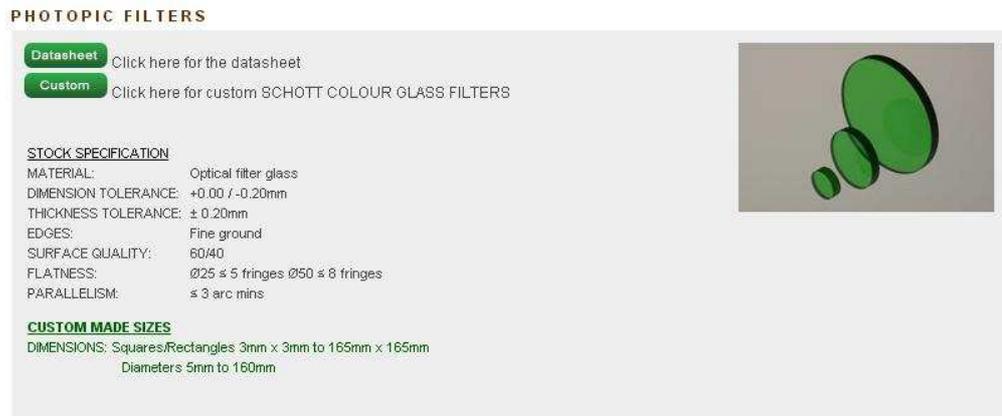
- Luz natural con tomas realizadas con luz solar.
- Luz led. Bombillas sevenON LED de 11W (equivalentes a 75W), 950 lm, luz blanca 4000K
- Foco halógeno de cuarzo 300W SONY HVL-300GA



Figura 51 Algunas fuentes de luz utilizadas

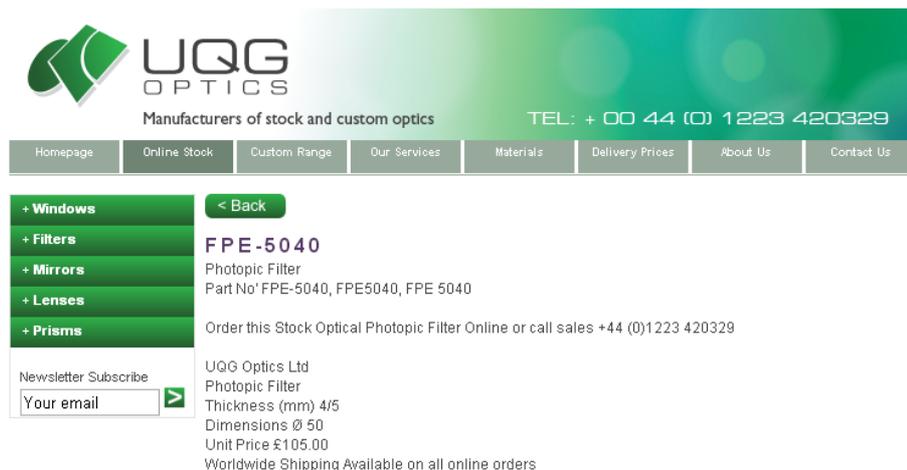
Aunque las pruebas se hicieron con distintas fuentes de luz, inclusive mediciones externas al aire libre (luz solar), los mejores resultados de interior se obtuvieron con lámparas led de 950 lúmenes, 11W (equivalentes a bombillas de 75W clásicas), luz blanca de 4000K. El hecho de disponer de múltiples puntos de luz LED en su interior y por disponer de un difusor rectangular en una superficie lateral facilitó una adecuada distribución de la luz en las plantillas. Esto había supuesto un problema con bombillas esféricas normales debido a que, aunque a simple vista no se distingue, estas bombillas no dan una distribución homogénea, empeorándose la situación a cortas distancias por ser la distribución inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Si las fuentes de luz están a gran distancia, pequeñas variaciones de algún centímetro no provocan grandes cambios, sin embargo si la fuente está a algunas decenas de centímetros de la superficie, pequeñas variaciones de algún centímetro sí provocan cambios apreciables en la luminosidad. Esta situación nos reportó algunos inconvenientes inicialmente.

- Filtro fotópico.



**Figura 52 Filtro fotópico**

En el equipamiento disponible para este trabajo se dispuso de un filtro FPE-5040 de respuesta fotópica de la casa UQG Optics con el que se tiene la intención de realizar mediciones y establecer una comparativa con la respuesta. Este estudio implica no utilizar las ecuaciones de aproximación que emulan este comportamiento. Este estudio se ha planteado en líneas de futuro en tanto que la utilización de este tipo de filtro no resulta de uso inmediato en las cámaras comerciales propuestas así como que sería una línea de trabajo lo suficientemente extensa para constituir un trabajo en sí mismo.



**Figura 53 Características filtro fotópico FPE-5040 UQG Optics**

- Lectores GPS

La medición en campo de la contaminación lumínica debe ir acompañada de la posición en la que se realiza dicha medición. Tanto en entorno urbano como no urbano el operario que realiza una medición debe posicionar el lugar donde lo hace. La coordenada GPS localiza el punto de medición sin necesidad de que el operario deba anotar el lugar. En entorno urbano podría realizar la anotación por callejero pero eso no siempre es posible (solares, parcelas, ...) y, en entorno no urbano el único medio es la coordenada GPS.

Los medidores GPS pueden ser de lectura manual, en cuyo caso el operario debe anotar la información, o de conexión con PC (RS-232, USB, Bluetooth, ...). En este último caso un programa, inclusive el mismo programa que esté registrando la contaminación lumínica, puede registrar el posicionamiento.

Otra aplicación del GPS conectado a PC es la realización de mapas a través de un vehículo que realiza el barrido de una zona, (calles, urbanización, instalaciones deportivas, ...). El programa podrá ir realizando un muestreo de información lumínica y posición para luego proceder a realizar el mapa a través de algún software de información geográfica (GIS, SIG).

Algunos de los instrumentos GPS disponibles en este trabajo son:

- Garmin Etrex. Manual y conexión RS-232



**Figura 54 GPS Garmin Etrex**

- Phoenix GPS Bluetooth.



**Figura 55 GPS Phoenix Bluetooth**

- Haicom HI-305 III. Compact Flash, USB, Bluetooth y RS-232



**Figura 56 GPS Haicom HI-305 III**

- Software

- CVI – National Instruments. El CVI es un entorno de programación C con las herramientas de edición y depuración clásicas para el desarrollo de programas C. Una de las características que le diferencian de otros entornos es su dedicación a la instrumentación electrónica en el sentido de disponer de librerías específicas de este entorno y, en lo que nos atañe, de la facilidad para la implementación y manejo de paneles virtuales. Un panel es la pantalla de usuario que visualiza los indicadores y controladores que el mismo maneja para el control de la aplicación, como puede ser la carátula de un instrumento. A diferencia de un panel mecánico, un panel virtual se representa en pantalla y tienen la facilidad de su programabilidad y reprogramación. El CVI

dispone además de una amplia librería para la programación y manejo del panel desde el programa principal. Esta facilidad nos ha permitido diseñar la aplicación con un interfaz gráfico para el control de nuestra aplicación.

- Microsoft Office 2007. De esta herramienta ofimática sobradamente conocida se ha utilizado el editor Word para la redacción de textos y, en la técnica, la hoja de cálculo Excel para el tratamiento de datos y curvas.
- Pentax Digital Camera Utility4.4. Software para el manejo de fotografías basado en el programa Silkypix Image Processing Engine de Ichikawa Soft Laboratory. Este programa nos ha permitido la lectura directa de los formatos RAW con la herramienta original del fabricante de la cámara. Así mismo nos ha permitido la lectura de los valores RGB y de los histogramas de las fotografías. El programa permite así mismo el manejo de la fotografía y modificaciones sobre la misma, aunque en nuestro caso no se ha utilizado ninguna de estas opciones dado que nuestro objetivo se basaba en los datos originales sin modificaciones.
- PhotoME 0.8B2. Programa para la extracción de los datos de la cabecera EXIF de las fotografías. Entre sus ventajas se encuentran la amplia información que extrae así como su adaptación a modelos y cámaras concretos. El mismo trata el formato DNG o RAW del modelo y cámara utilizados.
- Otros programas básicos incluidos en sistema operativo o de uso general (Paint, navegadores internet, ...)

## 5.7.- Propuesta: Utilización de cámaras comerciales.

### 5.7.1.- Introducción.

La utilización en el marco de la medición de la contaminación lumínica de cámaras fotográficas y/o de dispositivos basados en su principio de funcionamiento viene siendo aplicada desde hace varios años y ha ido evolucionando a la par de la evolución sufrida por la tecnología, evolución que en estos últimos años ha sido muy espectacular.

A finales de los años 90, principios del 2000, en particular en el ámbito astronómico, se comenzaron a utilizar cámaras digitales específicas para la medida de parámetros lumínicos. Estas cámaras, especiales y muy costosas, ofrecen prestaciones elevadas así como características añadidas tales como ruedas de filtros. (Figura 57) (Figura 58)

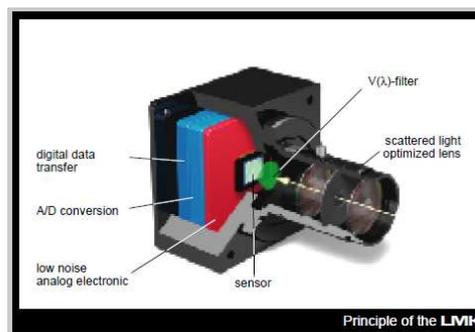
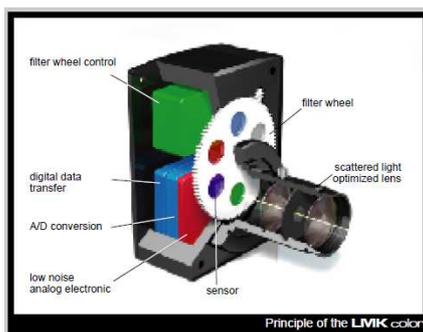
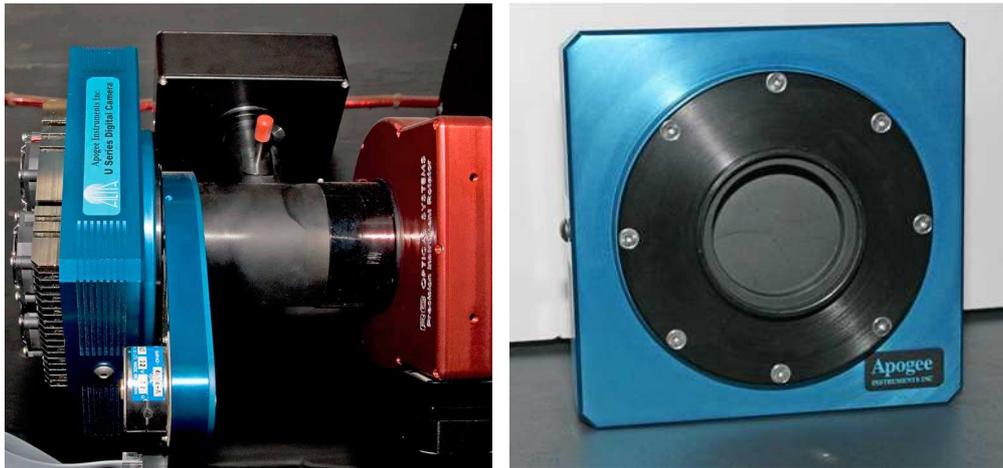


Figura 57 Cámaras específicas



**Figura 58 Apogee Alta U16M**

Estos dispositivos de medida se han utilizado en varias aplicaciones y métodos de medición, en particular en el ámbito de la astronomía.

En el contexto urbano existen los llamados video luminancímetros y fotomedidores de luminancia, basados en algunos casos en los principios de las cámaras fotográficas y que últimamente se emplean en la medida de alumbrado de zonas, como por ejemplo en alumbrado de túneles. La Figura 59 ilustra uno de estos video luminancímetros comerciales específicos

(Everfine, 2015)



**Figura 59 CX-2 IMAGING LUMINANCE METER**

Entre sus aplicaciones figura la medida de luminancia en carreteras y túneles (Figura 60). Así mismo, en las especificaciones (Figura 61) se puede observar que su precisión supera el 5%, lo que le mantiene en los órdenes que hemos mencionado.

Streetlight luminance and uniformity measurement



Fully comply with CIE 88-2004 <Guide for the Lighting of Road tunnels and Underpasses>and GB/T 5700 <Measurement Methods for Lighting>, and etc..

Figura 60 Aplicación típica del CX-2

Model	CX-2A	CX-2B
Measurement function	Single/multi point luminance, luminance uniformity, regional max, min, aver, min/max, min/aver values of luminance	
Resolution	1360×1024 effective pixels	
CCD size	11mm diagonal (2/3 inch)	
Temp. controlling	None	CCD working temp: 5°C Temp. stability: ±0.1°C
Luminance range	0.01cd/m <sup>2</sup> ~ 15kd/m <sup>2</sup> ~ 1500kd/m <sup>2</sup> (one 1% density filter) ~ 150,000kd/m <sup>2</sup> (two 1% density filter)	0.1mcd/m <sup>2</sup> ~ 2kd/m <sup>2</sup> ~ 200kd/m <sup>2</sup> (one 1% density filter) ~ 20,000kd/m <sup>2</sup> (two 1% density filter)
Luminance accuracy	±5%	
Luminance repeatability	±1%	
Exposure time per single shot	5ms~10s	
Lens focus	f:56mm(Standard field) or f:12mm(Wide field)	
Field of view	Standard field: 9.1°(horizontal)× 6.7°(vertical) Wide field : 41°(horizontal )× 32°(vertical )	
measuring distance	150mm to infinite	
Minimum measuring area	≥24mm×18mm @150mm distance	
Test mode	Single exposure / Multiple exposure	
Communication interface	USB2.0	
Power requirement	DC12V or AC220V (through AC adapter)	DC5V or AC220V (through AC adapter)
Standard accessories	MCU, AC adapter, USB cable, software, aluminum box	
Optional accessories	Density filter, 30m vehicle cigarette lighter connecting cable	

Figura 61 Especificaciones CX-2

Estos instrumentos, de los que los mostrados no son más que un ejemplo ilustrativo, se plantean para la realización de mediciones luminotécnicas y, en consecuencia, son de aplicación a la medición y evaluación de la contaminación lumínica.

Algunos se prestan al uso en determinados contextos (astronómicos, evaluación de alumbrado de túneles,...). Si bien resultan ser una mejora sustancial a la instrumentación actualmente propuesta por la normativa, en particular del luminancímetro, mantienen en su contra su elevado coste y utilización específica así como su no disponibilidad gran público.

El reciente avance tecnológico y de prestaciones de las cámaras comerciales DSLR, como hemos anticipado, nos plantea evaluar su utilización para la medición y evaluación de la contaminación lumínica. Aún en el supuesto de que no alcanzaran las precisiones de instrumentos específicos, la aportación de otras ventajas y prestaciones puede resultar de interés para esta actividad.

### **5.7.2.- Luminancímetro, ¿instrumento para medir la contaminación lumínica?- La cámara fotográfica digital como alternativa.**

Uno de los instrumentos utilizados en gran parte de la normativa para las mediciones en el contexto urbano es el luminancímetro.

El luminancímetro, como hemos presentado anteriormente, mide la luminancia de una fuente de luz, habitualmente en  $\text{cd}/\text{m}^2$ . Este instrumento posee un filtro fotópico de manera que lo que se mide es la luz en la medida en que es percibida por el ojo humano. Esta valoración es correcta, originariamente, a la hora de evaluar la calidad de una instalación de alumbrado en el marco de validar que los niveles de iluminación son adecuados para la visión humana. En este sentido, los orígenes de la normativa parten de los reglamentos de instalaciones de alumbrado y su eficiencia energética. Con posterioridad a estos reglamentos se les ha incorporado el concepto de “calidad del cielo nocturno” en una respuesta a la demanda de corregir los perjuicios que produce la contaminación lumínica. Ahora bien, la contaminación lumínica tiene diversos aspectos y no todos están directamente relacionados con el espectro visible por el ojo humano.

Si medimos la luminancia de una escena con la respuesta del ojo humano, su resultado será correcto a la hora de evaluar si esta escena está adecuadamente iluminada para el servicio al que se destina. Sin embargo lo que se está midiendo no reproduce realmente la cantidad de luz emitida con independencia de que sea perceptible o no por el ser humano. Otro aspecto relacionado con la visión humana es que en valores bajos el ojo responde más a una curva isotópica, en valores medios a una curva mesópica y sólo en condiciones de iluminación “normales” (diurna) su respuesta es fotópica. Por su parte el luminancímetro y otros instrumentos que utilicen filtros o respuestas fotópicas utilizan esta respuesta para todas las condiciones.

Hemos aceptado una definición de la contaminación lumínica como la “emisión de luz, en particular por la noche, con intensidades, direcciones o rangos espectrales inadecuados”. Prescindiendo de la dirección (contemplada en otro aspecto), si medimos la intensidad con un luminancímetro sólo evaluamos el rango espectral visible para el ser humano, en cierto modo correcto para evaluar la idoneidad de dicha iluminación para cumplir con su objetivo. Sin embargo no medimos la cantidad de luz emitida fuera del espectro fotópico (visible por el humano) con lo que no se está evaluando aquella luz emitida y que no es “adecuada para la realización de las actividades previstas en las zonas alumbradas”.

Como medida de la eficiencia de la instalación de alumbrado esta medición puede ser correcta, sin embargo para evaluar la contaminación lumínica no parece que sea la herramienta más adecuada.

Inclusive en el rango de la visibilidad humana, ésta no es la misma según intensidades, como hemos mencionado, y puede tener comportamientos fotópico, mesópico o isotópico. Sin embargo el luminancímetro sólo incluye el filtro fotópico lo cuál no sería correcto para los otros comportamientos de la visión humana.

A modo de ejemplo, una fuente luminosa con una alta componente azul (como podría ser el LED), medida con un luminancímetro con respuesta fotópica no sería evaluada correctamente puesto que la componente azul quedaría severamente atenuada por el filtro de respuesta fotópica. Sin embargo, esta componente azul podría ser muy perjudicial para el entorno astronómico.

En el mismo sentido, existen otros entornos perjudicados por la contaminación lumínica. Así se constatan efectos sobre poblaciones animales cuya respuesta visual no tiene porqué ser la misma que la del humano.

Existen poblaciones animales y vegetales cuyo hábitat es urbano o periurbano y que se ven afectadas por la contaminación lumínica, no necesariamente en el espectro fotópico mencionado.

Este razonamiento nos lleva a reforzar la idea de que la instrumentación necesaria para la medición de la contaminación lumínica no puede ser única, en tanto que la propia contaminación lumínica en sí tiene distintas facetas y aspectos por lo que cada uno de éstos requerirá de la instrumentación más adecuada. En este sentido ya algunas herramientas utilizadas por los astrónomos incluyen ruedas de filtros para particularizar la medición realizada a determinados efectos.

Adaptar un luminancímetro para que tuviera las distintas respuestas mencionadas y adecuar la medición a los valores que correspondieran a la respuesta de la visión humana sería una cuestión poco viable ya que no permiten el cambio de filtros. La propuesta de la utilización de cámaras digitales si está abierta a una mejor adaptación en este sentido. Por una parte las cámaras específicas incluyen incluso ruedas de filtros que podrían ser utilizadas para adecuar las respuestas y, por otra, tanto las específicas como las comerciales, al poder realizar un procesado posterior de la información RGB, permitirían un tratamiento de señal para efectuar dicha adaptación.

Consecuentemente, la utilización de cámaras digitales con este objetivo encuentra aquí otra justificación, muy importante, para ser planteada como alternativa y mejora a la utilización del luminancímetro.

### 5.7.3.- Metodología utilizada.

Entre los objetivos de esta parte del trabajo se encuentra encontrar un método fiable pero a la vez de fácil implementación y bajo coste para caracterizar una cámara fotográfica digital comercial para la medición de luminancia. La norma ISO 14524: 1999 “*Method for measuring opto-electronic conversion functions (OECFs)*” es una base utilizada por casi todos los trabajos de esta índole.

Con este fin se plantea esta parte del trabajo como:

- Estudio de los parámetros a medir y comparación con los instrumentos actuales.
- Estudio/comparativa de los principios de funcionamiento de la cámara y su sensor.
- Caracterización de los parámetros y herramientas asociadas a la cámara.
- Determinación de un método para calibrar nuestra cámara.
- Validación del método.

El estudio de los parámetros a medir y su comparación con los instrumentos actuales se basará en la información obtenida de los estudios previos del estado del arte, la contaminación lumínica y los requisitos según contextos que se han realizado previamente. Básicamente se establece la necesidad de medir luminancia con una cámara fotográfica como alternativa al luminancímetro clásico.

Con este fin, el segundo punto establecerá una comparativa entre los principios de funcionamiento de ambos dispositivos con objeto de anticipar la viabilidad del objetivo final.

En el tercer apartado, partiendo de la información obtenida en el primero, se analizan los parámetros, en particular las posibles fuentes de error, a considerar en la utilización de la cámara fotográfica para medir luminancia teniendo en cuenta que su objeto final no es éste.

La cuarta etapa consistirá en determinar un método que permita calibrar la cámara para realizar las mediciones requeridas. Habida cuenta de que ya se han propuesto algunos métodos por otros autores, se analizarán estos y se buscará la posibilidad de aportar mejoras y/o alternativas.

Finalmente se procederá a validar el método propuesto mediante la concepción de un programa software o herramienta de validación. Así mismo, utilizando el mismo, se realizarán las mediciones pertinentes y conclusiones.

#### **5.7.4.- Estudio de los parámetros a medir y comparación con los instrumentos actuales.**

En el contexto urbano que estamos tratando el instrumento utilizado es el luminancímetro señalado por las normativas relacionadas con el alumbrado público y las instalaciones luminosas. En este sentido, nuestro primer objetivo será plantear una alternativa, mediante el uso de cámaras fotográficas comerciales, a dicho instrumento.

Las mediciones que especifican los reglamentos que desarrollan las mencionadas normativas no sólo hablan de las magnitudes a cuantificar (en nuestro caso la luminancia) sino que incluyen una serie de condicionantes en los que la utilización de cámaras fotográficas resuelve cuestiones no triviales en la utilización del luminancímetro. Así, algunas medidas hablan de valores medios, valores máximos e incluso de integración de valores en zonas restringidas.

Esta idea se refuerza a la hora de interpretar expresiones que el propio Ministerio de Industria, Energía y Turismo realiza en la “Guía Técnica de aplicación: Eficiencia Energética en instalaciones de alumbrado exterior. Mediciones luminotécnicas en las instalaciones de alumbrado. GUÍA-EA-07, revisión 1.1”, que edita en mayo 2013, (Ministerio\_de\_Industria\_Energía\_y\_Turismo, 2013) y en las que quedan abiertas diversas interpretaciones en lo referente a la medida con el luminancímetro e incluso con diferentes tipos de luminancímetros. Entre estas cabe extraer expresiones como:

- *Para ello, los luminancímetros deben disponer de sistemas ópticos especiales y de precisión para obtener dichos ángulos de observación, por lo cual son generalmente equipos propios de laboratorio, y su utilización no resulta adecuada para las medidas de campo que deben realizar las entidades de inspección.*

La propia guía, cinco años después de la edición de la ITC-EA-07, no considera adecuado el uso del luminancímetro a la hora de realizar mediciones de superficies y ángulos de observación. La utilización de fotografías con posibilidad de procesado de zonas, áreas y ángulos, se postula pues como una alternativa a considerar.

- *Teniendo en cuenta los límites establecidos en la tabla 3 de dicha ITC-EA-03, un rango de medida entre 2 y 1000 cd/m<sup>2</sup> sería el adecuado.*

En algunas de las propuestas que se realizan en esta tesis se postula un rango dinámico del orden de 6EV en la fotografía digital. Esto supone una diferencia entre máximo y mínimo de 64 veces el valor mínimo. Con un valor mínimo, por ejemplo, de 0,5 cd/m<sup>2</sup> una fotografía tendría un valor máximo de 32 cd/m<sup>2</sup>. A su vez, una segunda fotografía con un mínimo de 32 cd/m<sup>2</sup> tendría un valor máximo de 2048 cd/m<sup>2</sup>. Consecuentemente, con dos fotografías se abarcaría todo el rango considerado como adecuado para las mediciones necesarias según la ITC-EA-03 (para nuestro contexto urbano). Esta consideración será de gran utilidad a la hora de proponer metodologías para la medición con fotografía digital ya que nos permitirá restringir las múltiples combinaciones de condiciones de disparo.

- *Según las Recomendaciones relativas al Alumbrado de las Vías Pública de la Asociación Francesa del Alumbrado AFE, en la elección del diagrama de apertura del luminancímetro se debe ser especialmente minucioso.*

- *Una abertura rectangular de 6' de arco en anchura y de 2' de arco en altura o una abertura circular de 2' de arco de diámetro, se adaptan a las medidas de luminancias en las calzadas.*

- *Con un ángulo de inclinación del eje del luminancímetro de 1° bajo la superficie horizontal, cuando se efectúan las mediciones se tiene en cuenta una superficie de la calzada constituida por un trapecio de 15cm de base y de 2,9m de altura, o bien una elipse con un eje menor de 5 cm y uno mayor de 2,9m.*

Nuevamente nos encontramos con la necesidad de procesar áreas y superficies concretas que no resultan triviales con la utilización del luminancímetro en tanto que un proceso por programa de la fotografía puede resolver sin excesiva dificultad.

- *El método de referencia para comprobar la luminancia media dinámica consiste en hacer dos medidas con el luminancímetro integrador, una comenzando la zona de medida entre dos luminarias y otra coincidiendo con una de las luminarias (en el caso de una disposición tresbolillo, entre dos luminarias en diferentes carriles). La media de estas dos medidas es **una buena aproximación** a la luminancia media dinámica.*

La propia guía habla de “una buena aproximación” lo que refuerza la idea de establecer “evaluaciones” de los parámetros y no mediciones exactas, prácticamente imposible de definir. Nuevamente el procesado por programa permite el establecimiento de algoritmos capaces de fijar aproximaciones más definidas.

- *La sensibilidad, corrección espectral, campo de medición, estabilidad, calibrado y el visor del luminancímetro utilizado, estarán adaptados a las condiciones específicas exigidas para **el alumbrado de calzadas**.*

En esta afirmación se confirma que las normativas actuales centran su atención principal y requisitos en el alumbrado de calzadas y, aunque la regulación de términos relativos a la contaminación lumínica se ha añadido a estas, quedan muchos aspectos relativos a la contaminación lumínica no cubiertos por las mismas. Dentro de este abanico de aspectos no considerados cabe destacar los parámetros a evaluar así como los instrumentos para su medición ya que en el alumbrado se miden luminancia e iluminancia, en un espectro visible concreto para el ojo humano y utilizando un instrumento, el luminancímetro, que incluso no resulta adecuado o recomendable para determinadas mediciones del propio alumbrado.

Nuestra propuesta de la utilización de cámaras fotográficas no sólo es pues una herramienta a considerar en el marco de la evaluación y medición de la contaminación lumínica sino que, además, se postula como una solución práctica para la medición de instalaciones de alumbrado, con el añadido de que ambos contextos están estrechamente relacionados.

### 5.7.5.- Estudio/comparativa de los principios de funcionamiento de la cámara y su sensor.

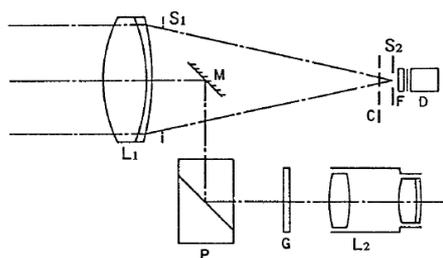
Asumiendo que por ahora la normativa contempla el luminancímetro como instrumento de medida, en este apartado estableceremos una comparativa entre el mismo y nuestra propuesta para poder plantearla como alternativa o complemento.

Al comparar los principios de funcionamiento del luminancímetro clásico y de la cámara fotográfica digital se observa que las similitudes son muchas con lo que se puede anticipar que no existirán grandes impedimentos en obtener resultados similares, al menos bajo este punto de vista.

El luminancímetro clásico (Figura 62) basa su funcionamiento en un sensor de luz (por ejemplo un fotodiodo) sobre el que se concentra el haz de luz entregado por una óptica que captura y proyecta la escena a evaluar con el ángulo de apertura estipulado. Un espejo refleja una copia de la zona evaluada sobre un visor en el que el usuario puede observar la misma. El sensor integra pues el total de luz proyectada sobre él y correspondiente al ángulo de apertura de la óptica.

#### MEASURING SYSTEM

##### Optical system



- |    |                         |   |                                     |
|----|-------------------------|---|-------------------------------------|
| L1 | Objective lens          | C | Chopper                             |
| L2 | Eyepiece lens system    | F | Spectral-response correction filter |
| M  | Total-reflection mirror | D | Silicon photocell                   |
| S1 | Aperture stop           | P | Porro prism                         |
| S2 | Field stop              | G | Focusing screen                     |

Figura 62 Principio de funcionamiento del luminancímetro. Diagrama de bloques. (Minolta)

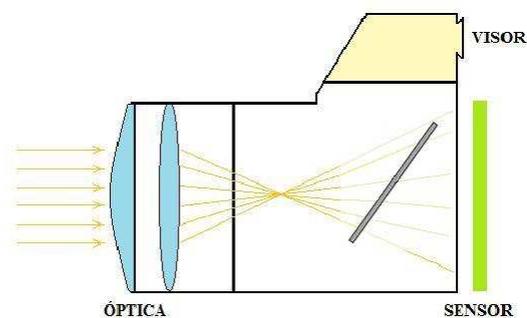
De hecho, el propio fabricante del LS-110 incluye en las prestaciones del dispositivo la expresión SLR (single-lens-reflex):

- *SLR (single-lens-reflex) optical system*

*The LS-100's single-lens-reflex design ensures that there will be no deviation between the actual measurement area and the area indicated in the viewfinder. Eliminating the effect of illumination outside the measurement range, this flareless optical system ensures accurate measurement of only the target area.*

relevándose así la analogía tecnológica con las cámara DSLR.

Por su parte las cámaras DSLR tipo réflex disponen de una óptica que proyecta la imagen a captar sobre el sensor. A su vez, un sistema de espejo proyecta la imagen hacia un visor donde el usuario puede observar la escena a fotografiar (Figura 63). La cámara dispone además de un diafragma y de un obturador para variar la apertura del haz de luz y el tiempo de exposición. Así mismo la información captada por el sensor podrá amplificarse/atenuarse obteniéndose el efecto de sensibilidad (ISO) de las películas antecesoras.



**Figura 63 Principio de funcionamiento de la cámara digital DSLR.**

Con principios de construcción similares, la diferencia más señalada radica en el sensor. En el caso del luminancímetro, éste obtiene un valor único correspondiente a la cantidad de luz que recibe el fotodiodo y que será la procedente del ángulo de apertura proyectado por la óptica. El luminancímetro persigue medir el valor de la luminancia correspondiente a un punto de la escena por lo que los ángulos suelen ser muy estrechos ( $1^\circ$ ,  $1/3^\circ$ , ...). Algunos luminancímetros de escena pueden tener ángulos más amplios ( $20^\circ$ )

persiguiendo evaluar la media de una determinada zona de la escena (por ejemplo medida de alumbrado de túneles).

Por su parte, la óptica de la cámara proyecta la escena completa sobre la superficie del sensor que, a su vez, se puede considerar como una matriz de  $n \times m$  puntos o sensores puntuales (píxeles). Sobre cada pixel se recogerá pues la luz integrada por el área correspondiente de la matriz proyectada de la escena. En realidad, en las cámaras de color, la matriz mencionada estará formada por una matriz de sensores y un filtrado para codificar las componentes de color RGB. A los efectos de la comparativa que ahora estamos haciendo nos abstraemos de este hecho y consideramos la fotografía como una matriz de puntos sobre los que se ha proyectado la imagen captada. Bajo esta concepción se puede considerar la fotografía como una “matriz de luminancímetros”.

Al menos y en principio, desde el punto de visto de la concepción mecánica de ambos instrumentos, se puede considerar que no existen diferencias tecnológicas que impidan a priori obtener resultado similares.

En lo referente a la previsión de precisión, la precisión del luminancímetro dependerá de la linealidad del sensor, en su caso un fotodiodo. Por su parte la de la cámara dependerá a su vez de la linealidad de la matriz de píxeles. Tanto en sensores CCD como en sensores CMOS existe suficiente literatura para prever que esta linealidad existe y nos permitirá obtener una respuesta aceptable. Esta linealidad de los sensores CCD y CMOS se refiere a la de sus principios tecnológicos, otra cuestión serán los errores de linealidad debidos a cuestiones de fabricación, tecnológicas y de proceso (ruido, saturación, “vignetting”, corrección gamma, ...)

Consecuentemente no sólo no se prevén impedimentos tecnológicos para utilizar las cámaras fotográficas con fines equivalentes a la utilización del luminancímetro sino que se puede anticipar una ventaja añadida como es la de considerar la fotografía como una “matriz de luminancímetros” que realizan la medida simultánea sobre todos los puntos de la escena en lugar de sobre uno determinado.

Otra ventaja reseñable de la fotografía es que la información obtenida se almacena en un fichero digital que puede ser procesado con posterioridad. Desde este punto de vista se añaden prestaciones como obtención de valores máximos, mínimos, medios, ... así como poder incluso determinar valores medios de zonas o ángulos concretos, lo que equivaldría a variar el ángulo de medida del luminancímetro y todo ello con posterioridad a la toma y con una sola toma.

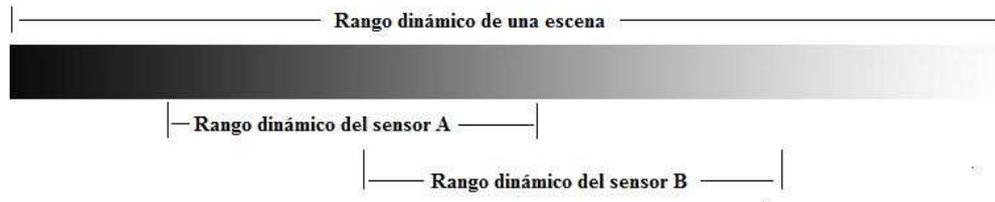
## **5.7.6.- Caracterización de los parámetros y herramientas asociadas a la cámara.**

### **5.7.6.1.- Introducción.**

El código RGB que representa los píxeles de un fichero correspondiente a una fotografía digital no es un valor absoluto de la cantidad de luz correspondiente a cada punto de la escena que éstos representan. Para que ello fuera posible el rango dinámico del sensor debería abarcar desde el cero absoluto hasta el máximo posible de cualquier escena. En este sentido un sensor tendrá un máximo en el que alcanzará la saturación y que no necesariamente coincide con el de la escena.

Los rangos dinámicos de las escenas y sensores están limitados por sus fuentes y/o sensibilidades respectivas. La sensibilidad de los sensores, incluido el ojo humano entendido como tal, no abarcan desde el cero absoluto al infinito. Dependiendo de esta sensibilidad el mínimo percibido (cero) no tiene porqué ser el cero absoluto ni el máximo (saturación) se corresponde con el infinito. Un determinado sensor tendrá una sensibilidad mínima que se codificará como cero y un nivel de saturación o máximo que se codificará como máximo en su rango dinámico. Un sensor con una sensibilidad dada tendrá un nivel mínimo a partir del cual no podrá discernir niveles inferiores en tanto que otro sensor con mayor sensibilidad podrá discernir estos valores hasta el mínimo de su rango dinámico. Lo mismo ocurrirá con los niveles máximos. Si el rango dinámico de la escena es mayor que el del sensor, éste no podrá reproducir todo el rango de la escena y presentará saturaciones mínimas y/o máximas en su reproducción.

Si en una escena podemos admitir el mínimo como el cero absoluto (ausencia total de luz), en un sensor este mínimo no será este cero absoluto sino el valor mínimo que éste es capaz de detectar o sensar.

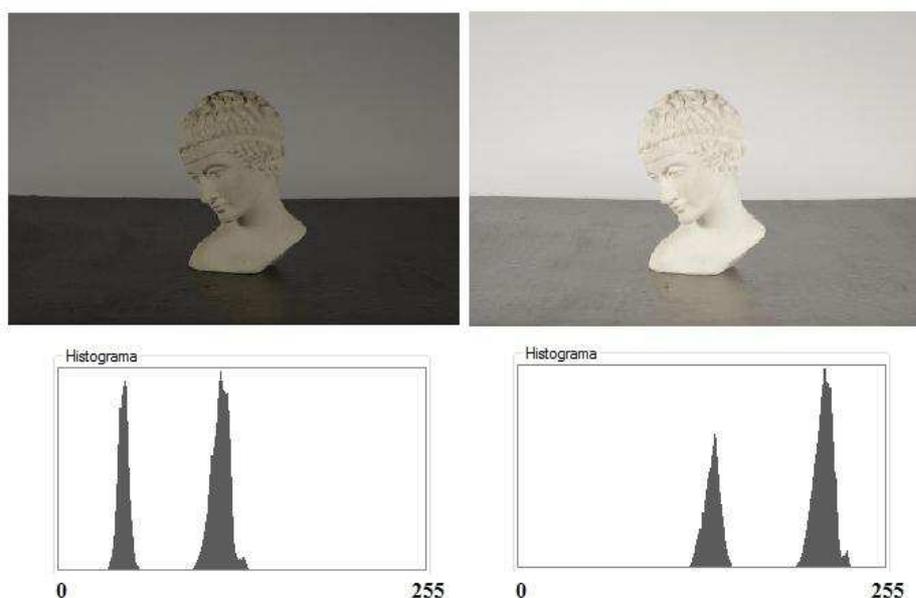


**Figura 64 Ajuste de rangos**

En el ejemplo de la Figura 64 el sensor A discernirá valores oscuros y saturará con niveles medios de luminosidad de la escena, presentando valores saturados por encima. Por su parte, el sensor B presentará como negros valores medios de grises de la escena en tanto que saturará con niveles mayores de luminosidad.

Esta situación se repite con un mismo sensor si variamos los tiempos de exposición y/o la apertura de un diafragma que regulen la cantidad de luz que alcanza el sensor por unidad de tiempo. En un símil doméstico podemos concebir la idea de un recipiente bajo un caudal de lluvia constante, el nivel de llenado alcanzado por el recipiente dependerá del tiempo que lo mantengamos y de la apertura que le demos a su boca.

En una cámara fotográfica digital la cantidad de luz recogida por un pixel no es necesariamente la emitida por la escena. En este sentido las condiciones de apertura del diafragma, el tiempo de exposición y, en cierto modo, la sensibilidad o ISO establecen dicha cantidad recibida. En una misma escena expuesta durante un tiempo determinado se recogerá la mitad de luz si está expuesta la mitad de tiempo.



**Figura 65 Diferente exposición en una misma escena**

En las imágenes de la Figura 65 se observan dos fotografías de una misma escena con idénticas condiciones de iluminación. La codificación RGB de cada una no responde pues a un valor absoluto de la luminosidad de la escena sino a la proporción de ésta que ha capturado el sensor en cada caso. Un mismo código RGB no indica el valor de luz emitido por el objeto sino la parte de éste que ha recibido el sensor según las condiciones de exposición fijadas en la cámara.

Consecuentemente, para extraer la información de los valores de luminancia de la escena se necesitan, además del valor RGB de cada pixel, las condiciones de exposición bajo las que se ha tomado la fotografía.

#### **5.7.6.2.- Histograma. El histograma como fuente de información.**

El histograma de una fotografía es una información gráfica de la misma donde se representa en el eje X los valores RGB (de 0 a 255 para 8 bits) y en el eje Y el número de veces de se presenta este valor. En las imágenes de la Figura 65 se observan dos valores predominantes que corresponden al fondo y base, cartulinas blanca (fondo) y negra (base).

En realidad se obtienen cuatro histogramas de una fotografía, uno por cada uno de los colores primarios (R, G y B) y un cuarto con el valor de brillo correspondiente a los tres que se obtiene de la fórmula de conversión a brillo que utilice el fabricante y que nos daría la fotografía equivalente en blanco y negro (brillos).

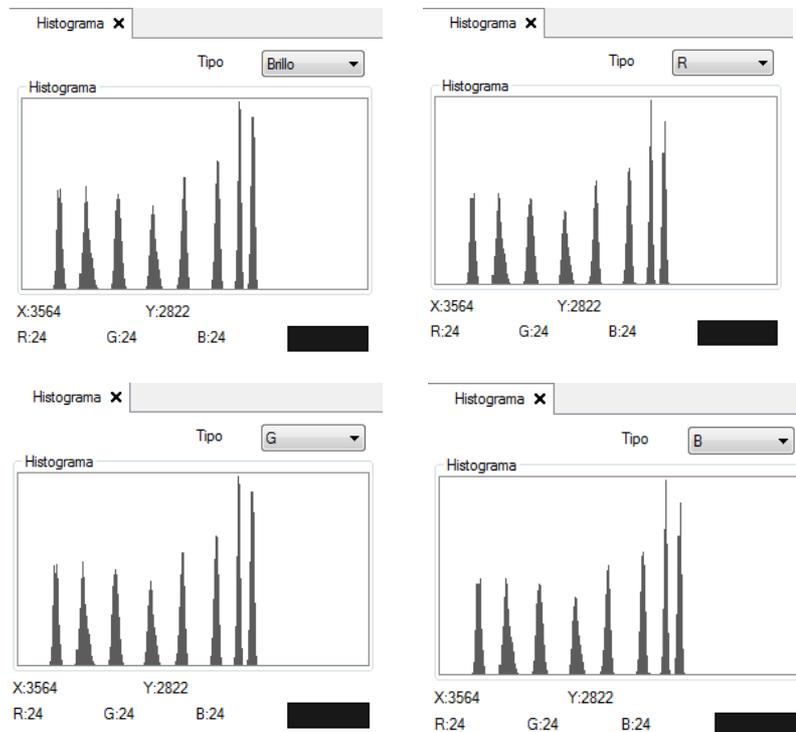


Figura 66 Histogramas obtenidos con Pentax Digital Camera Utility 4

Seleccionando en la pestaña “Tipo” podemos ver el histograma correspondiente bien al brillo total, bien a cada una de las componentes R, G o B.

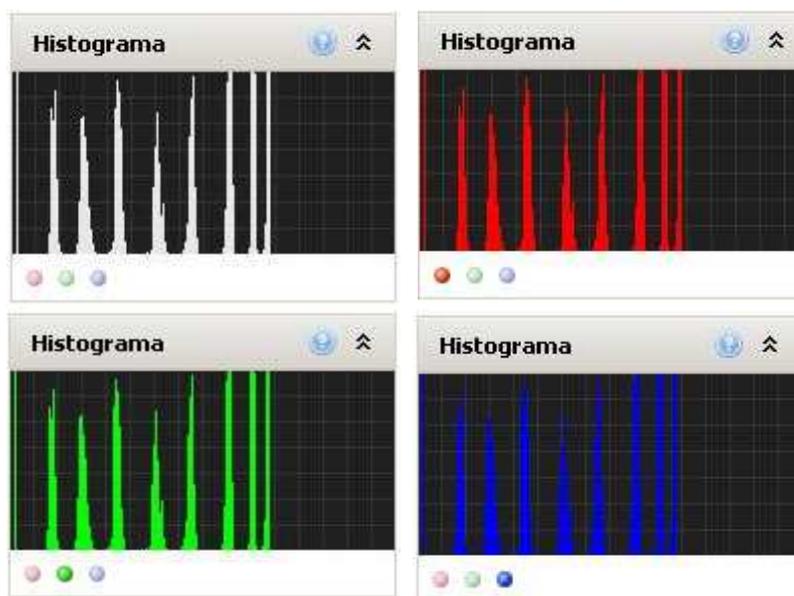
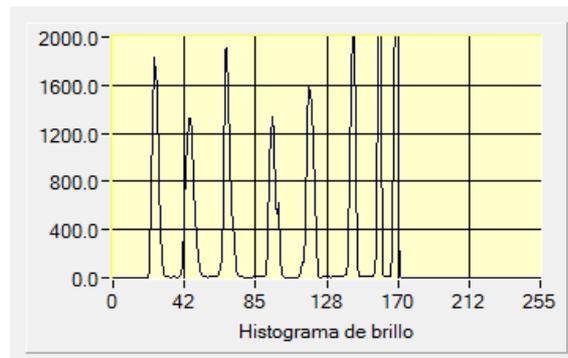


Figura 67 Histogramas obtenidos con PhotoME

La mayoría de las herramientas de tratamiento de imágenes suelen ofrecer los histogramas de la imagen. En las figuras 66 y 67 se muestran ejemplos obtenidos con la aplicación Pentax Digital Camera Utility 4 y con la aplicación PhotoME utilizadas en este trabajo. La aplicación CVI que se ha desarrollado también genera el histograma respectivo lo que a su vez ha permitido validar el tratamiento realizado a la imagen. (Figura 68)



**Figura 68 Histogramas obtenidos con la aplicación CVI desarrollada**

Aunque aparentemente la información que da el histograma no parece ser útil para obtener datos lumínicos, ya que la codificación RGB que porta es relativa a las condiciones en que se captura la imagen, esta herramienta resultará de gran utilidad a la hora de combinarla con los patrones de grises ya que en ellos se observará la distribución de estos patrones y, además, variando las condiciones de disparo, se podrá deducir el algoritmo utilizado por el fabricante para distribuir el rango dinámico asociado a la codificación de 0 a 255.

Incrementando y decrementando la exposición (EV) de las fotografías y observando los desplazamientos producidos en el histograma se puede inferir la codificación y el rango dinámico aplicado por el fabricante.

### **5.7.6.3.- Codificación de color y brillo.**

La codificación del color y del brillo correspondiente a un píxel de una fotografía puede realizarse de diversas maneras y existen multitud de convenios y normas de representación del color y brillo.

La escala cromática de colores corresponde al espectro de longitudes de onda asociado a cada color como se puede observar en la Figura 69:



**Figura 69 Escala cromática**

Esta escala se limita al espectro aceptado como visible por el ojo humano. Ahora bien, esta escala de longitudes de onda no supone la gama de colores distinguibles por el hombre. Así, la combinación de estos colores e intensidades da lugar gamas de colores, o paletas. Hay colores distinguibles por el ojo humano que no provienen de una longitud de onda pura sino que el ojo percibe al combinarse más de una de estas longitudes de onda. En este sentido, a la hora de representar y/o codificar los colores surgen múltiples propuestas, convenios y normas basadas en los estudios sobre el color. Estos convenios o normas surgen a la hora de representar los colores en distintos soportes, desde la impresión gráfica hasta los dispositivos electrónicos como pantallas o las cámaras fotográficas. Estos estudios se supeditan a su vez a los requisitos del ojo humano para la diferenciación de los colores. El objeto final es que una imagen captada y/o reproducida por un dispositivo (mecánico/físico ó electrónico) sea percibida por el ojo humano en las mismas condiciones que si percibiera el original.

Los estudios de la visión humana nos llevan a que el sistema ocular de percepción de color se basa en un principio de triestímulo de los llamados colores básicos correspondiente a tres longitudes de onda a las que son sensibles tres tipos de células sensoras de la retina llamadas conos. Esta concepción de la visión humana lleva al concepto de visión fotópica como la respuesta del ojo humano al espectro de frecuencias y su intensidad (Figura 70). Además de los conos existen los llamados bastones, más sensibles, en particular hacia el azul, y que actúan en condiciones de baja luminosidad (oscuridad). Esta mezcla de sensibilidades da lugar a las llamadas visiones fotópica (conos), escotópica (bastones) y mesópica (intermedia).

Estos contextos de aplicación y estudios nos podrían llevar a otras tesis y trabajos por lo que se extraerán de la bibliografía y hemeroteca aquellos conceptos finales que interesan a nuestro trabajo.

El concepto de “luminancia”, que sí forma parte fundamental de nuestro estudio, ya lleva implícita la respuesta fotópica de la visión humana en el sentido de que en su definición interviene el flujo luminoso, que a diferencia del flujo radiante, incorpora el concepto de “potencia percibida” de una luz monocromática de 555 nm por la máxima respuesta del ojo humano.

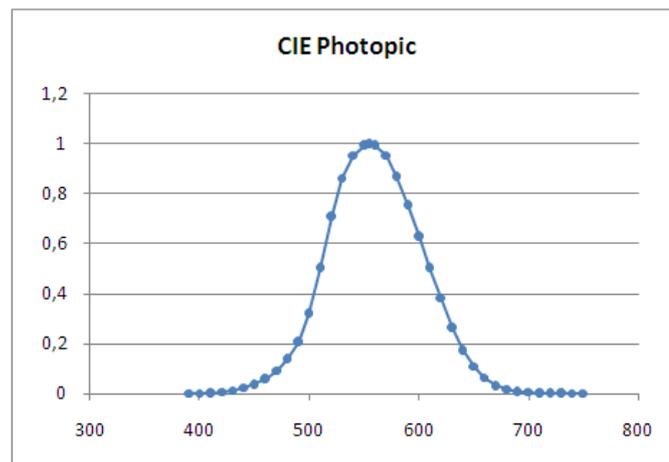


Figura 70 Curva fotópica CIE

El efecto producido por la luminancia es el del brillo, pudiendo tenerse diferentes valores de brillo para mismas longitudes de onda.

Esta concepción de la potencia percibida tiene implicaciones en los rendimientos y mediciones de eficiencia de los sistemas de alumbrado en el sentido de que la energía consumida en longitudes de onda o intensidades no percibidas por el ojo humano no cumplirán los objetivos de alumbrado por lo que se considerarían como energía perdida no útil. Por otra parte, la percepción de los colores se basa en el efecto triestímulo mencionado donde un color determinado responderá a la combinación de los tres colores llamados elementales, detectados por los tres tipos de conos (rojo, verde y azul).

El estudio de estas combinaciones y de su reproducción en sistemas físicos (impresión, captura, reproducción,...) es así mismo otro campo muy amplio de teorías y trabajos que tampoco son el objeto final de esta tesis. Nuevamente se extraerán aquellos conceptos útiles para nuestros fines.

Básicamente, la representación del color por triestímulo parte de tres colores elementales, por ejemplo rojo, verde y azul, cuya combinación ponderada da lugar a los colores percibidos por el ojo humano.

Nuevamente nos encontramos con diferentes teorías y modelos capaces de representar la gama de colores percibida por el ojo humano y que tendrán campos de aplicación más o menos idóneos según contexto y objetivos. Algunos de estos sistemas han acabado siendo aceptados en la mayoría de los contextos si bien unos encuentran mejores respuesta según su entorno (reproducción impresa, fotografía digital, pantallas de reproducción, ...).

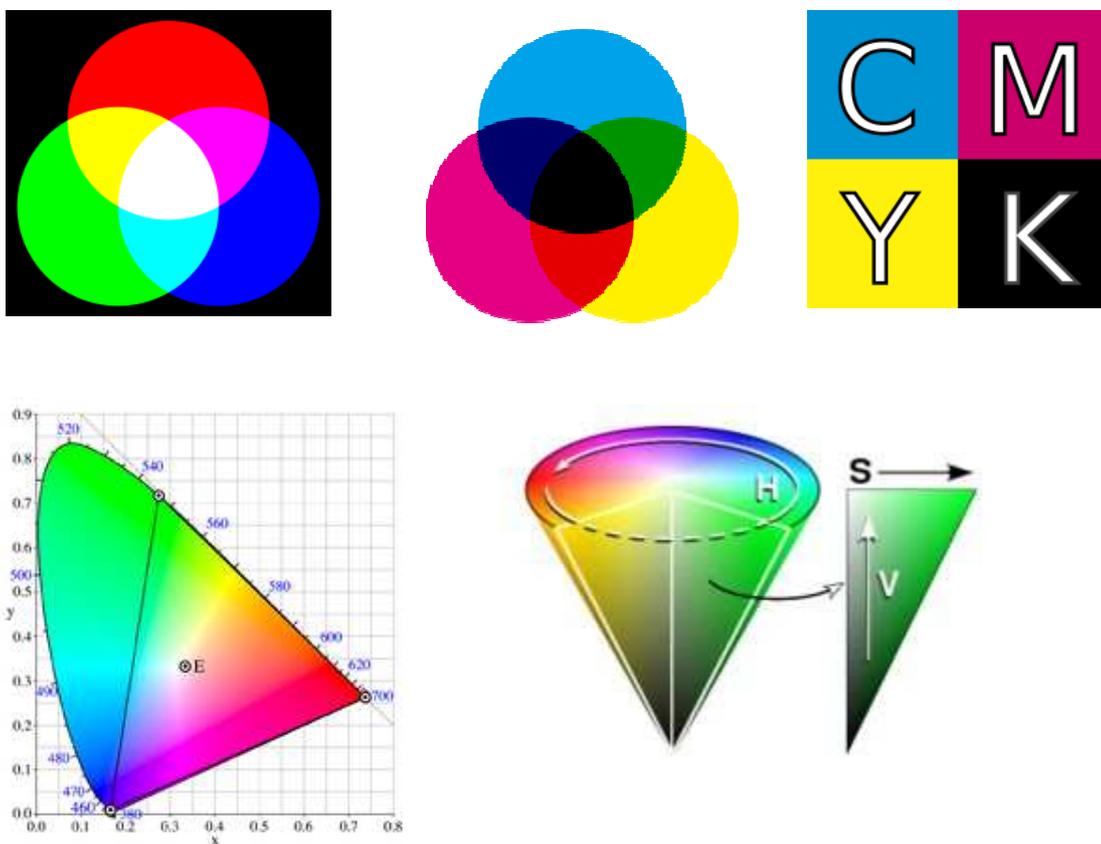


Figura 71 Modelos de color

Entre los más destacados en nuestro entorno se encuentran los modelos RGB, basados en una suma ponderada de los colores Rojo, Verde y Azul, su variante sRGB que supone una variación de éste, el modelo CMYK, sucesor del RYB, utilizados más en impresión y artes gráficas, y que se basan en un sistema sustractivo con los colores cian, magenta, amarillo y negro.

Así mismo se tienen otros sistemas de codificación como el propio RGB, que a su vez puede incorporarse en la base de otros, el HSL (HSV, HSB), (Hue, Saturation, Light) o el YPbPr. La CIE (Comisión Internacional del Alumbrado) definió un espacio de color denominado espacio de color CIE 1931, a partir de un CIE RGB previo, que goza también de una aceptación amplia y que a su vez presenta variantes. El sistema RGB, en aplicaciones más gráficas y de impresión, tiene otra variante, la RGBA, donde la A indica un grado de transparencia utilizado en estos contextos.

En el caso de las cámaras fotográficas, que nos ocupa, la representación RGB es una de las más utilizadas así como la variante sRGB. Aún así se están produciendo cambios y nuevas propuestas constantemente en respuesta a la continua aparición de nuevas tecnologías y aplicaciones. (Pascale, 2003) (Nielsen & Stokes)

Además de la definición y codificación de los espacios de colores, los formatos de soporte digital de las fotografías también son múltiples y variados, si bien algunos prevalecen. El formato más elemental y completo es el llamado RAW. Inicialmente este formato contiene toda la información de la fotografía original. Dado el amplio rango dinámico alcanzado, el elevado número de píxeles capaces de captarse hoy y el alto número de bits utilizado, estos formatos suelen ser de tamaño muy grande. Otro inconveniente de este formato es que no es habitual que los fabricantes utilicen un modelo estandarizado y cada fabricante suele tener sus especificaciones propias por lo que resulta poco operativo en términos generales amén de que a veces incluso puede haber partes reservadas del fichero.

En el contexto de la fotografía digital, al margen de los mencionados formatos RAW, existen nuevamente diferentes formatos, algunos de los cuales han ido alcanzando altos niveles de aceptación. Formatos de todos conocidos como los bmp, jpg, tiff, ... están hoy aceptados como estándares y cualquier programa de edición gráfica los admite y trata. Igualmente se pueden convertir unos a otros. Dada la particularización por fabricantes de los formatos RAW, éstos suele suministrar programas para su conversión a otros formatos más estándares (generalmente JPG) y/o, la propia cámara ya entrega este último formato procesado.

La codificación de un pixel conlleva pues al menos dos conceptos, uno el color, basado en la combinación RGB, u otro modelo de componentes elementales, y otro el brillo. Un mismo color puede tener distinto brillo, así mismo un color responde no sólo a la combinación de las componentes elementales sino de la ponderación de éstas. La evaluación del brillo se hace relativa a la percepción del ojo humano y ésta no es la misma a diferentes colores. Una misma potencia lumínica no será percibida del mismo modo por el ojo humano si está aplicada en un color o en otro. La curva fotópica de percepción del ojo humano muestra que la mayor sensibilidad se presenta sobre los 550 nm, en torno al verde.

Consecuentemente, para evaluar el brillo de un pixel acorde a la respuesta del ojo humano, se aplican fórmulas, básicamente suma ponderada de las componentes RGB:

$$\text{Brillo} = Y = K_R R + K_G G + K_B B$$

donde  $K_R$ ,  $K_G$  y  $K_B$  son constantes de ponderación.

La especificación IEC/4WD 61966-2-1 (International\_Electrotechnical\_Commission, 1998) establece estos pesos como :

$$\text{Brillo} = Y = 0,2162 R + 0,7152 G + 0,0722 B$$

si bien según fabricantes y/o contextos estos pesos pueden diferir obteniéndose distintos matices para una misma escena. La suma de los tres pesos es 1 de modo que el brillo resultante también se codifica de 0 a 255. El 0 se correspondería con el negro y el 255 con el blanco, entendiendo la escala de brillos como una escala de grises (origen de la fotografía en blanco y negro).

#### 5.7.6.4.- Sistema sRGB.

El sistema RGB inicialmente estaba concebido para la representación de colores en pantallas de tubos de rayos catódicos (CRT), pantallas planas, televisores, escáneres, cámaras digitales y sistemas de impresión. El sistema sRGB nació para adaptar el RGB a las nuevas tecnologías de procesado hardware y software, así como de internet, con el menor coste. (International\_Electrotechnical\_Commission, 1998)

En lo relativo a la codificación del brillo que perseguimos en nuestro trabajo las ecuaciones a extraer son:

Se normalizan a 1 los rangos:

$$R'_{sRGB} = R_{8bit} \div 255,0$$

$$G'_{sRGB} = G_{8bit} \div 255,0$$

$$B'_{sRGB} = B_{8bit} \div 255,0$$

Si  $R'_{sRGB}$ ,  $G'_{sRGB}$ ,  $B'_{sRGB}$  es menor o igual que 0,04045

$$R_{sRGB} = R'_{sRGB} \div 12,92$$

$$G_{sRGB} = G'_{sRGB} \div 12,92$$

$$B_{sRGB} = B'_{sRGB} \div 12,92$$

sino, si  $R'_{sRGB}$ ,  $G'_{sRGB}$ ,  $B'_{sRGB}$  es mayor que 0,04045 :

$$R_{sRGB} = \left[ (R'_{sRGB} + 0,055) / 1,055 \right]^{2,4}$$

$$G_{sRGB} = \left[ (G'_{sRGB} + 0,055) / 1,055 \right]^{2,4}$$

$$B_{sRGB} = \left[ (B'_{sRGB} + 0,055) / 1,055 \right]^{2,4}$$

Por otra parte,

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,4124 & 0,3576 & 0,1805 \\ 0,2126 & 0,7152 & 0,0722 \\ 0,0193 & 0,1192 & 0,9505 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{sRGB} \\ G_{sRGB} \\ B_{sRGB} \end{bmatrix}$$

ecuaciones de las que se obtiene la expresión antes mencionada:

$$\text{Brillo} = Y = 0,2162 R + 0,7152 G + 0,0722 B$$

#### 5.7.6.5.- Información suministrada por la cámara.

Si el sensor de la cámara no tiene un rango dinámico tan amplio como para abarcar cualquier escena en una misma toma, para situar su rango dinámico en la zona de interés de la misma es necesario modificar las condiciones de disparo (tiempo de exposición, diafragma e ISO). El principio es el mismo que utiliza el ojo humano abriendo o cerrando la pupila.

Para una determinada condición de disparo el sensor puede evaluar un rango dinámico que es el que codificará, en nuestro caso de 0 a 255. Dependiendo de donde haya centrado su rango dinámico en el rango de la escena podrá representar el rango de valores correspondiente

a la misma saturándose, es decir representando como negros los valores inferiores y blanco los superiores, para valores exteriores a la ventana. (Figura 72)

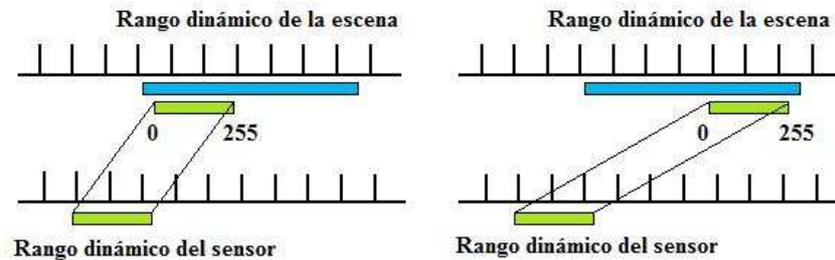


Figura 72 Traslado del rango dinámico

¿Cómo determina la cámara el valor sobre el que centrar el rango dinámico del sensor? Generalmente existen diversos modos o técnicas para realizar esta evaluación. Dado que el objeto de la cámara es fotografiar una determinada imagen, la misma intentará que ésta resulte lo más idóneamente expuesta para su mejor reproducción. Hay escenas homogéneamente iluminadas con lo que el valor idóneo de exposición sería aquél que centrara el rango del sensor sobre el valor medio del rango a exponer. En otras ocasiones puede ocurrir que determinadas zonas de la escena estén más o menos iluminadas que otras. En este caso se intentará exponer adecuadamente aquella zona que resulte de interés. En la fotografía clásica el fotógrafo utiliza un exposímetro con el que mide la iluminación de la escena. Cuando desea abarcar el valor medio de la escena utiliza el exposímetro como luminancímetro integrador midiendo desde la cámara hacia la escena y percibiendo consecuentemente la cantidad de luz emitida por la escena (luz reflejada). (Figura 73 (a)). En otras ocasiones, si desea exponer adecuadamente una determinada zona de la escena, medirá, a modo de luxómetro, la iluminación recibida por la misma y determinará el nivel de reflexión para calcular la exposición adecuada para esa zona (luz incidente). (Figura 73 (b)).

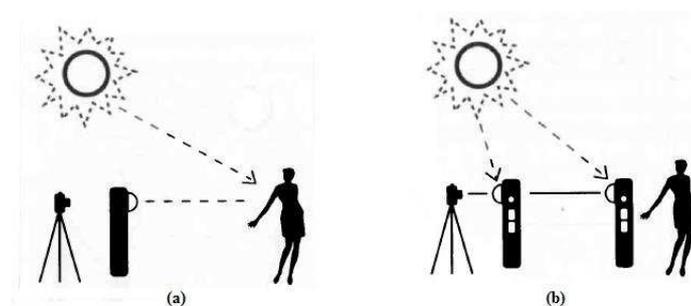


Figura 73 Medición de luz reflejada (a) o incidente (b) (Manual Polaris SPD100)

Por lo general las cámaras DSLR incorporan esta medición, precisamente aprovechando su capacidad de medir la cantidad de luz percibida. El proceso puede ser automático (la cámara determina la exposición idónea) o manual (la cámara indica al usuario la exposición y éste determina los valores a fijar).

La cámara es capaz de determinar el brillo de cada pixel de su imagen pero esta información no resultaría útil al fotógrafo. Consecuentemente se suele ofrecer unas opciones de valores medios con objeto de que el usuario pueda decidir el método acorde a la escena que desea fotografiar. En este sentido es normal disponer de tres métodos clásicos, más o menos personalizados según fabricantes y modelos. Una de las opciones es evaluar la luminosidad y exposición adecuada a un punto central (o pequeño círculo central) de modo que el fotógrafo puede apuntar (y retener) este punto hacia una determinada zona de la escena que desea que sea la más adecuadamente captada. Una segunda opción es ofrecer una media ponderada desde el centro de la escena hacia el exterior primando la zona central que generalmente es la que se pretende captar adecuadamente. Finalmente, la tercera opción, llamada multisegmentos, es obtener una valoración ponderada de diferentes segmentos en los que se ha fraccionado la escena.

 Multisegmentos	Divide el visor en 16 partes, mide cada porción y determina la exposición adecuada. (Predeterminado)
 Pond al centro	Mide el visor completo poniendo especial énfasis en el centro y determina la exposición.
 Puntual	Mide sólo un punto en el centro del visor y determina la exposición.

**Figura 74 Modos de medición luminosidad**

Una vez que la cámara ha evaluado el nivel requerido de luminancia de la escena o parte de ésta a optimizar, se debe situar el rango dinámico efectivo a codificar por el sensor para que se satisfaga la optimización. En este sentido cabría pensar que situar el valor evaluado en el centro del código (128) podría ser lo más razonable entendiendo que los valores de mayor y menor brillo se repartirían alrededor de este valor medio.

En fotografía, principalmente debido a que la respuesta del ojo humano a los cambios de luminosidad no es lineal y a las distintas respuestas que tienen los distintos sistemas de reproducción (impresión, pantallas, proyectores, ...) este valor medio no suele coincidir con la

mitad de la zona codificada. En este sentido no existe nuevamente un valor estándar aceptado y hay mucha literatura al respecto que habla del llamado gris medio y que versa principalmente sobre los valores adecuados para fines fotográficos y no para la medición de luminancia como es nuestro caso.

En este sentido, uno de los objetivos de nuestro trabajo será determinar, empíricamente, dado que es un dato que los fabricantes no suelen suministrar, el valor o referencia asignado a la lectura realizada.

Bajo el punto de vista de la exposición, esta exposición adecuada puede obtenerse por diversas combinaciones diferentes. Así, si duplicamos el tiempo de exposición y dividimos por dos el área del diafragma, la cantidad de luz que alcanza el sensor será la misma. Desde el punto de vista de la fotografía existirán otras razones para elegir o primar unas u otras combinaciones (profundidad de campo, escena en movimiento, ...). Desde el punto de vista de evaluar la cantidad de luz que alcanza el sensor no debe de existir, en la teoría, una diferencia apreciable.

En fotografía se necesita pues una medida del valor de exposición adecuado que el fotógrafo utilice para calibrar su cámara consecuentemente. Con este objeto se establece la unidad de medida llamada EV (Exposure Value) que relaciona el brillo medido con los parámetros de la cámara adecuados para el mismo:

$$EV = \text{Log}_2 \frac{B S_x}{K}$$

$$EV = \text{Log}_2 \frac{A^2}{t}$$

donde B es el brillo medido ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ),  $S_x$  la relación de ISO referida a ISO 100, K es una constante particular de cada cámara y fabricante, A es el diafragma y t el tiempo de exposición. El concepto de ISO proviene de la sensibilidad de la película y era una constante

una vez elegida ésta. Actualmente, en fotografía digital, responde a un concepto de amplificación de la información almacenada en el sensor y su tratamiento es equivalente salvo que se puede modificar para diferentes tomas en tanto que en la fotografía clásica era una propiedad de la película. Al ser una amplificación su tratamiento debe considerarse diferente ya que en realidad no traslada directamente condiciones de cantidad de luz que alcanza el sensor. Si se duplica el tiempo de exposición, se duplica la cantidad de luz que alcanza el sensor, en tanto que si se duplica el ISO lo que se hace es amplificar por 2 la cantidad de luz medida en unas condiciones determinadas. Esto, que en principio parece equivalente, no lo es tanto a efectos reales pues existen otras consideraciones como ruido para niveles bajos, cuantización y otras cuestiones a tener en cuenta. Existe bastante literatura al respecto incluyendo algunas que desmitifican estas ideas. (Spielman, 2001)

La utilización de los logaritmos permite una escala lineal al fotógrafo, así el doble de brillo supone un +1 en EV que se traduce en dividir por dos el tiempo de exposición o el área del diafragma. (La medida del diafragma  $A$  se expresa en fotografía como  $1/f$  y su valor es inverso al diámetro de la apertura e interviene en su cuadrado ( $A^2$ ) para reflejar el área. En consecuencia su valor es inverso al área (un 22 tiene menor área que un 5,6)).

Esta misma unidad se puede utilizar para evaluar el rango dinámico de la fotografía. Así, disminuyendo en un EV la exposición programada se duplicará el área del diafragma o el tiempo de exposición. En consecuencia la fotografía resultaría sobreexpuesta (clara). Si por el contrario aumentamos en un EV la exposición, se dividirá por dos el área o el tiempo de exposición con lo que la fotografía resultará subexpuesta (oscura). Una variación de 6 EV, por ejemplo, supone una variación de  $2^6 = 64$  veces el nivel de brillo. Se puede así determinar el rango dinámico de una fotografía (rango entre máximo y mínimo nivel de brillo representado) utilizando la unidad de EV.

Cuando se dice que una máquina tiene un rango de 9, 10 o 12 EV no significa que abarque todo el rango en una toma. Tampoco serviría de mucho porque la fotografía obtenida no se podría reproducir en un soporte impreso o electrónico con el mismo rango. La propia visión humana tampoco tendría esa respuesta. En realidad la máquina puede barrer ese amplio rango pero variando los tiempos de exposición y diafragma pero desplazando un rango dinámico menor en ese abanico. La máquina puede fotografiar una zona oscura o una zona

---

muy brillante pero no simultáneamente. Es el caso típico de la fotografía a contraluz en la que si se ajusta la máquina para una adecuada exposición el fondo sale saturado y si se ajusta para que el fondo salga correctamente expuesto, el tema central sale oscuro. Actualmente hay técnicas de tratamiento de imagen que permiten corregir zonas de una toma mediante el disparo de más de una fotografía en condiciones diferentes (HDR, ...). Las propias cámaras pueden incorporar esta técnica.

En consecuencia, para poder evaluar la luminancia de la escena se hace necesario conocer las condiciones de disparo de la toma. Sólo los valores RGB de cada pixel no son suficientes para tal objetivo.

Los distintos formatos que puede tener una fotografía digital suelen incluir mucha información de la misma, incluidas estas condiciones de disparo. Un clásico en este sentido es la llamada cabecera EXIF, una información incluida en el fichero de la fotografía además de la información de los píxeles.

Aunque existen estándares sobre el formato EXIF, desgraciadamente hay una gran variedad de variantes según fabricantes e incluso modelos. Así mismo existen multitud de programas que extraen esta información de la fotografía. Los datos más elementales suelen obtenerse con relativa facilidad, incluyendo la propia información de las propiedades de una fotografía que obtiene el sistema operativo, como el Windows.

Para la extracción de los datos de la cabecera EXIF de la fotografía se puede recurrir a programas que lo permiten. Generalmente las cámaras digitales ofrecen programas para el tratamiento de sus fotografías y éstos suelen incluir información de la cabecera. A veces no incluyen toda la información de la misma y sólo presentan los datos principales. Tal es el caso de nuestra aplicación “Pentax Digital Camera Utility” utilizada en nuestro trabajo.

Para disponer de todos los datos, o más datos que los básicos, se recurre a otros programas explícitamente diseñados con este fin. En nuestro caso hemos utilizado el programa “PhotoME” que detallamos seguidamente.

### 5.7.6.6.- Cabecera EXIF.

Como acabamos de mencionar, para extraer la información contenida en la cabecera de la fotografía, o cabecera EXIF, existen multitud de programas, muchos de ellos de libre distribución. En nuestro caso hemos optado por el programa “PhotoME” por la amplia información que extrae de la cabecera, en particular de nuestra cámara, llegando incluso a suministrar una distribución gráfica de las lecturas de EV en la escena.



Figura 75 PhotoME

Este programa nos visualiza además la imagen y el histograma de la fotografía, tanto de brillo como de cada una de las componentes RGB. El resto de la información de la fotografía la distribuye en páginas o grupos.

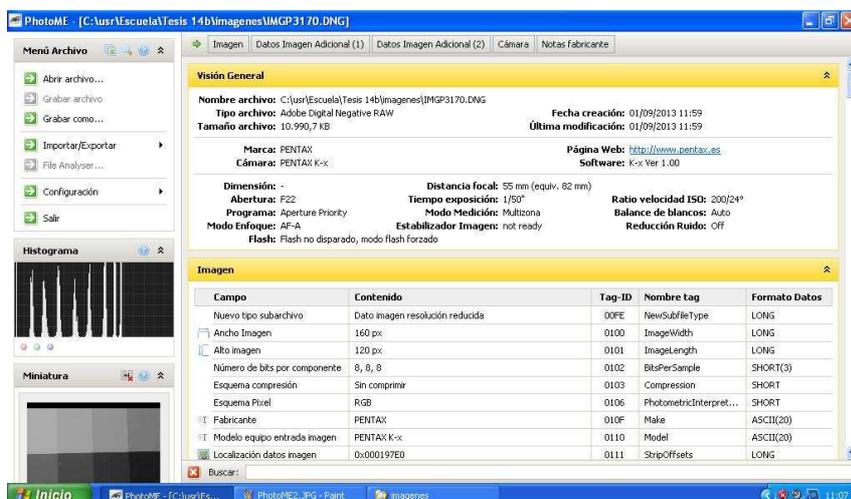


Figura 76 PhotoME cabecera.

Como hemos dicho, la información básica (tiempo de exposición, diafragma, ISO, formato,...) se puede extraer con prácticamente cualquier software, incluso en las mismas propiedades del fichero jpg con Windows. Sin embargo en la cabecera hay mucha más información como datos relativos al formato, conversión, medidas realizadas de exposición, segmentos, ... Uno de los problemas de extraer esta información es que cada fabricante utiliza un formato adaptado con lo que programas como el que se ha utilizado resulta de gran interés porque detectan el mismo y adaptan la información presentada. Así, dependiendo de la cámara y modelo, las pantallas ofrecidas no son siempre iguales.

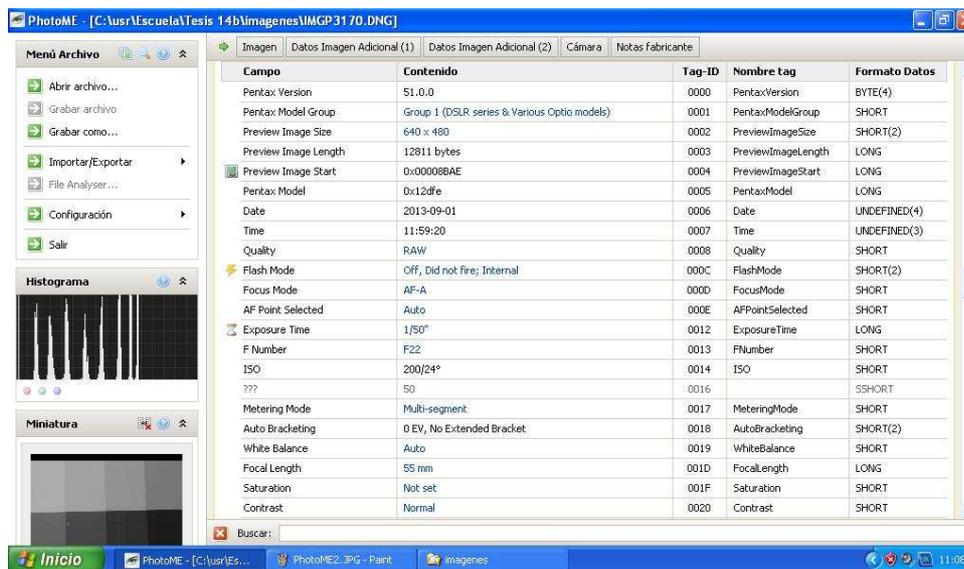


Figura 77 PhotoME datos imagen

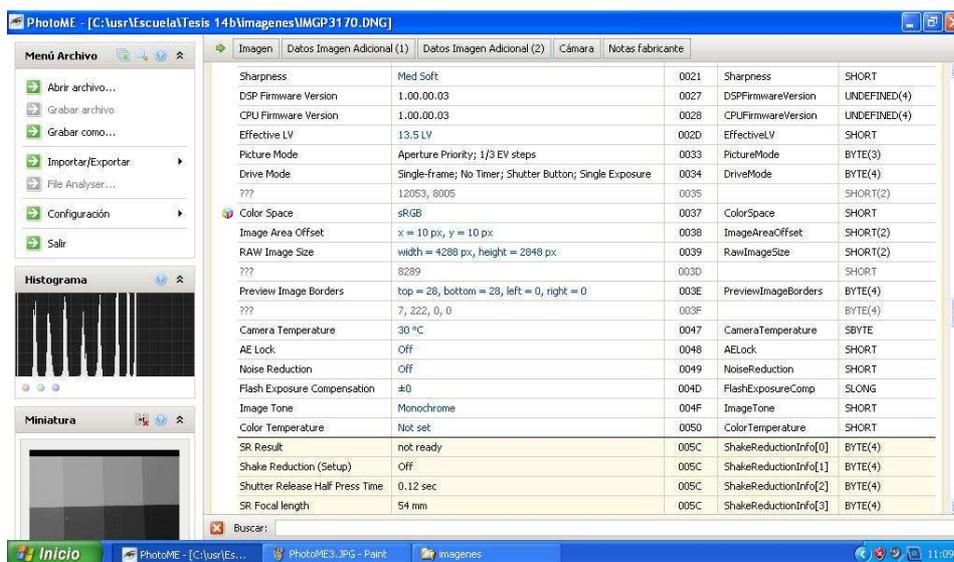


Figura 78 PhotoME datos imagen 2

Una de las informaciones más relevantes para nuestro trabajo es la información relativa a las lecturas de luminosidad que realiza la máquina (Figura 79):

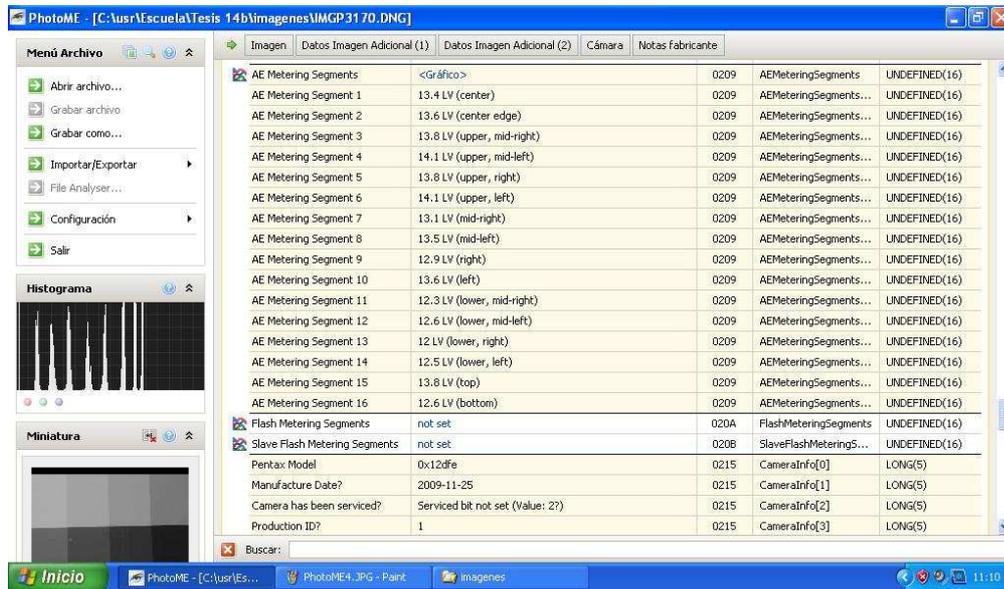


Figura 79 PhotoME información lectura segmentos

Dicha información se ofrece también gráficamente, por segmentos:

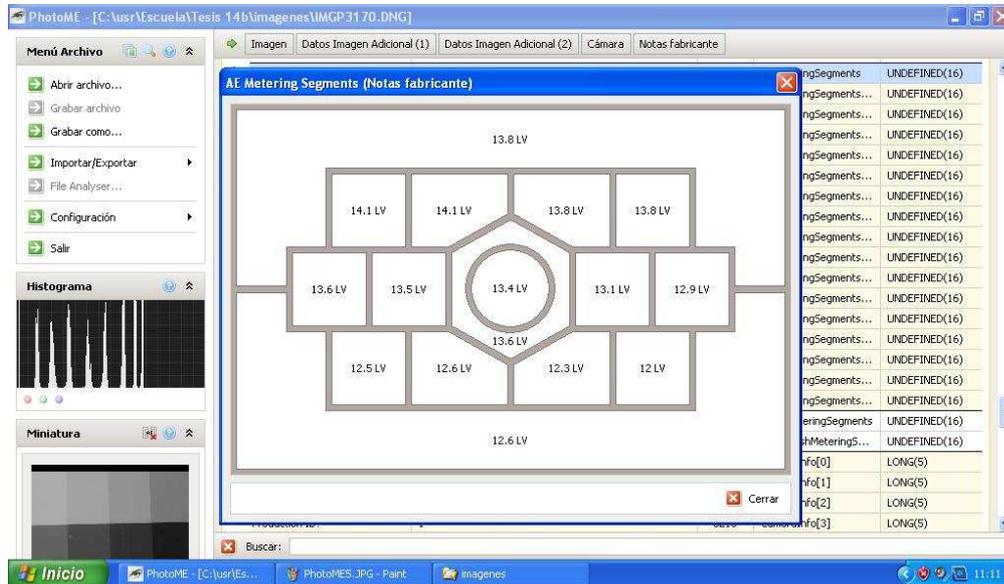


Figura 80 PhotoME información gráfica lectura segmentos

Gracias a la utilización de esta herramienta se han podido extraer los datos de la fotografía y sus condiciones de disparo que han permitido realizar diferentes pruebas y mediciones.

### 5.7.6.7.- Fuentes de error. Tratamiento y consideración.

Varios de los estudios que se han analizado analizan las fuentes de error más relevantes centrandolo su análisis en el origen de estos errores y en propuestas de corrección o compensación. En nuestro caso, además de considerar estos errores ya relevados, hemos intentado, por una parte añadir estas consideraciones a nuestro trabajo pero, por otra, buscar alternativas, no tanto a la corrección sino a la necesidad de su consideración o de cómo evitar su efecto.

Los errores más significativos que nos pueden afectar son:

- Error de linealidad del sensor.
- Error de ruido en valores bajos.
- Error de saturación y brillo en valores altos.
- Error de aproximación a la respuesta fotópica.
- Errores ópticos (“vigneteo”, ...)
- Error de cuantización en valores bajos.
- Errores de aproximación al EV (valores limitados de  $T_{exp}$ ,  $F_n$ , ...)
- Errores del instrumento de calibración (LS-110) y otros (luminarias, red, ...)

#### 5.7.6.7.1.- Error de linealidad del sensor.

En principio los estudios vistos al respecto, así como los principios de funcionamiento inherentes, indican que el sensor, tanto CCD como CMOS, posee una linealidad elevada por lo que no supone una fuente de error previsible para los márgenes establecidos.

Cabe indicar que tanto la tecnología como el principio de funcionamiento son similares a los del luminancímetro (óptica y sensor), con la única diferencia de que en el caso del luminancímetro la escena se concentra en el sensor, integrando éste la cantidad de luz recibida, en tanto que en la cámara, la escena se proyecta sobre una matriz de sensores (píxeles) integrando cada uno el punto correspondiente. Los errores esperables por linealidad serían pues de orden similar.

La linealidad presumida no se llega a cumplir en los extremos del rango y esto se refleja en las curvas tanto generadas en nuestras pruebas como en los otros estudios analizados. Las causas principales de esta pérdida de la linealidad son diferentes según nos encontremos en la zona baja o en la alta del rango. En la zona baja, la principal causa de pérdida de linealidad se debe a la presencia de ruido a niveles muy bajos y que se confunde con la señal. En este sentido el rango dinámico se establece no a partir del cero sino a partir del nivel de ruido mínimo. Existen múltiples estudios sobre esta zona, en particular en lo que afecta a la calidad fotográfica de estas zonas oscuras. En la zona alta, la proximidad a los valores de saturación así como el nivel elevado de brillo producen efectos de pérdida de la linealidad tanto por dicha saturación como por efectos de un pixel saturado sobre los circundantes.

En todo caso, asumidas estas pérdidas de linealidad en los extremos de la curva de transferencia, para nuestra aplicación, siguiendo los principios básicos de la instrumentación clásica, se utilizarán las zonas centrales del rango donde la linealidad resulta aceptable. Nuestro sistema permite desplazar el rango (con las condiciones de exposición), con lo que se utilizará siempre la zona central, a modo de “cambio de escala”, como se haría con cualquier instrumento de medida.

#### **5.7.6.7.2.- Error de ruido en valores bajos.**

Siendo el sensor un semiconductor el mismo presenta un ruido fruto de la propia tecnología de semiconductores que, entre otros, es función de la temperatura. Cuando los niveles de señal son tan bajos que alcanzan el orden de los niveles de ruido ambos se confunden y resulta imposible discernirlos. Por este motivo, dado que en esta zona no se puede realizar la medición, este nivel de ruido se establece como el menor del rango. La relación señal/ruido (SNR (Signal Noise Ratio)) se utiliza como referencia para establecer niveles aceptables o no. Precisamente la definición del rango dinámico se sujeta a los extremos mínimo y máximo de valores discernibles. El valor máximo se puede entender como el mayor valor que recibe un código único. (Kerr, 2008). Así, en nuestro caso, el valor máximo sería 254 ya que 255 no nos permitiría discernir entre el límite del rango y valores superiores que quedarían todos codificados con este código. El problema surge con el valor

mínimo que, aunque en principio debería ser cero, dado el nivel de ruido presente, no se toma como tal en tanto que los niveles que se confunden con el ruido no son útiles, ni para la fotografía ni para la medición. Ahora bien, toca establecer qué nivel del señal/ruido (SNR) se considera el mínimo aceptable. La norma ISO 15739 establece el valor de uno para este mínimo. El propio Kerr lo considera arbitrario en tanto que plantea si un valor inmediatamente inferior a uno no es válido y un valor inmediatamente superior sí lo es. (Kerr, 2008). Estos planteamientos y disquisiciones se realizan bajo el contexto de los fotógrafos y los tomamos con las debidas reservas.

Siendo un ruido asociado a la temperatura del semiconductor, las máquinas de altas prestaciones incorporan compensación de temperatura e incluso control de la misma mediante células de Peltier para mantener la temperatura a niveles bajos.

En nuestra aplicación, dado que el uso de cámaras comerciales de coste reducido es uno de los requisitos, el tratamiento de estos errores consistirá en no utilizar las zonas bajas del rango. En realidad la instrumentación clásica establece que, para todo instrumento de medida, la mayor precisión se establece en el centro del rango de medida no siendo recomendable trabajar en los extremos del mismo. Se ha de tener en cuenta que en la mayoría de nuestros casos no buscaremos una medida del rango sino unos límites a no superar. Esta decisión se valida así mismo por otras consideraciones como el error de cuantización que acaba por inutilizar esta zona baja. En este sentido, la utilización de 8 bits (256 valores enteros) limita la discriminación en tanto que un LSB resulta en  $1/256 = 3,90625$  milésimas que sería del orden de un 0,39% para el fondo de escala pero que en los valores bajos de la escala no resulta despreciable. Así, para el código 4, por ejemplo, un error de un LSB supondría un error del 25%.

#### **5.7.6.7.3.- Error de saturación y brillo en valores altos.**

En el extremo superior del rango se produce un efecto que nuevamente provoca la pérdida de la linealidad para valores próximos al 255. Básicamente se establecen dos influencias en este error. Por una parte la proximidad a los valores de saturación provoca una pérdida de linealidad. Por otra parte, los valores elevados de iluminación producen un efecto de influencia de unos píxeles sobre los circundantes.

Al igual que con el error de ruido en la zona baja, en nuestro caso se afrontará este ruido evitando la utilización de esta zona alta realizando las medidas en las zonas centrales del rango.

#### 5.7.6.7.4.- Error de aproximación a la respuesta fotópica. (Visión fotópica, isotópica y mesópica)

La medición que realiza un luminancímetro utiliza un filtro fotópico cuya respuesta refleja la de la visión humana. La medición de los parámetros lumínicos relativos a la luminancia incorpora una concepción relativa a la percepción humana en tanto que refieren una longitud de onda (555nm). El flujo luminoso es la energía radiada que recibe el ojo medio humano según su curva de sensibilidad y de él se obtienen otros parámetros, entre ellos la luminancia, objeto de nuestra medición. ( $\Phi$  = Flujo Luminoso (lm), 1 watt-luz a 555nm = 683 lm).

Un filtro fotópico es una lente óptica cuya respuesta responde a la respuesta de visión del ojo humano. La visión humana en realidad varía su respuesta en función de la luminosidad. La respuesta del ojo se fundamenta en dos tipos de sensores básicos, conos y bastones, y ambos tienen diferentes sensibilidades a bajos y altos niveles de luminosidad. Así, con una iluminación alta (visión diurna) la respuesta del ojo se define como fotópica y su curva se refleja en la Figura 81. A medida que disminuye la luminosidad (visión nocturna) la respuesta de los conos disminuye y empiezan a intervenir con más relevancia los bastones entrándose en lo que se denomina visión isotópica. Entre ambas respuestas se establece también lo que se denomina visión mesópica, como una respuesta intermedia.

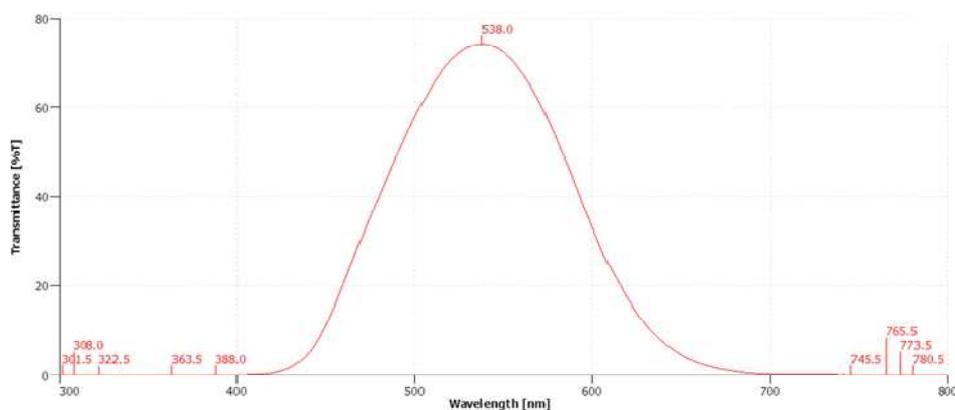


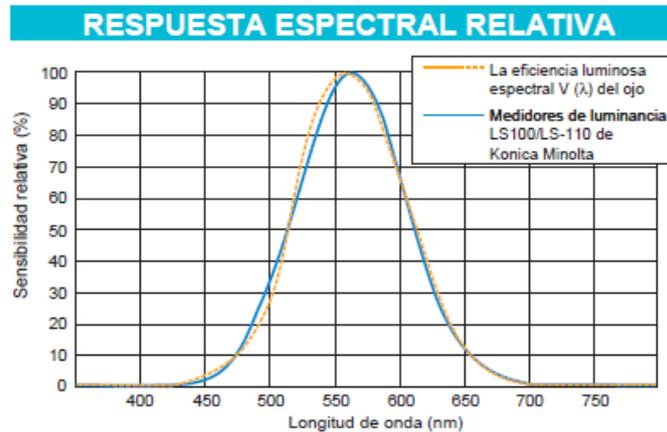
Figura 81 Respuesta fotópica filtro UQG Optics.

La visión humana en sí tampoco es una variable estable por lo que la definición incorpora un término no absoluto como “ojo medio”. A partir de ello se tienen diversas curvas fotópicas entre las que se destaca la que establece el CIE y que viene a ser utilizada por la mayoría de la literatura específica. Existen así mismo fórmulas y ecuaciones que aproximan con bastante precisión la curva CIE.

Una de las primeras consecuencias de esta definición de luminancia se convierte en uno de los focos de atención de nuestro trabajo, en particular en el planteamiento de consideraciones y líneas de trabajo futuras en tanto que, por ahora, nos ceñimos a los procedimientos establecidos y que se basan, entre otras cuestiones, en esta concepción de la respuesta “del ojo medio” o visión fotópica.

En nuestros planteamientos incluimos consideraciones en lo relativo a la medición de la contaminación lumínica dado que la actual normativa basa su medición en esta respuesta fotópica al considerar el rendimiento de las instalaciones de alumbrado como foco central de su eficiencia y dicho rendimiento obviamente se basa en el aprovechamiento que hace el humano de la energía gastada. Sin embargo, habida cuenta de otros factores implicados en los efectos negativos de la contaminación lumínica, como los contextos astronómico y medioambiental en los que el espectro afectado no es sólo el de la visión fotópica, cabe plantear una revisión de los conceptos y sistemas de medida actualmente establecidos por la normativa.

Incluso sin entrar en espectros particulares, por ejemplo en astronomía, el mero hecho de que esta actividad se plantea nocturna y con muy bajos niveles de iluminación supone que la respuesta humana se encontraría más hacia la respuesta isotópica y no la fotópica utilizada por instrumentos de medida como el luminancímetro.



Idealmente, la sensibilidad espectral relativa del medidor de luminancia debería coincidir con la  $V(\lambda)$  del ojo humano para la visión fotópica. Tal como se muestra en el gráfico anterior, la sensibilidad espectral relativa de los medidores de luminancia Konica Minolta LS-100/LS-110 se encuentra dentro del 8% ( $f_1'$ ) de la eficiencia luminosa espectral de CIE  $V(\lambda)$ .

CIE: Commission Internationale de l'Éclairage  
 $f_1'$  (valor CIE): El grado al cual la sensibilidad espectral relativa coincide con  $V(\lambda)$  caracterizado por medio del error  $f_1'$ .

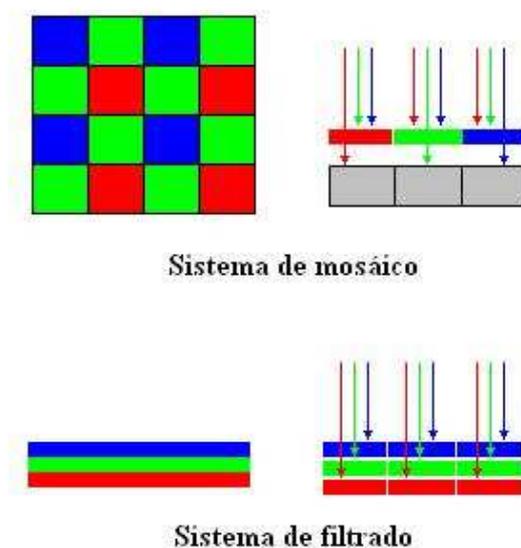
**Figura 82 Respuesta espectral LS-110**

Si se observa la curva de respuesta espectral suministrada por el propio fabricante del luminancímetro LS-110 (Figura 82) se pueden extraer algunas consideraciones relativas a lo comentado. Por una parte, dicha respuesta se aproxima a la fotópica ya mencionada y definida acorde al CIE. Esto nos plantea, como ya se ha mencionado, su validez a la hora de estimar mediciones en rangos bajos, donde la respuesta del ojo humano ya no se atiene a la misma. Por otra parte, en la misma figura, el fabricante indica que la aproximación a dicha curva se encuentra en el 8% del patrón CIE. Esta afirmación nos plantea nuevamente dudas sobre los conceptos de precisión y de si dicha desviación se debe añadir a la precisión del instrumento.

Como se ha visto existen múltiples factores que pueden afectar a una adecuada evaluación de la medida efectuada para que ésta sea acorde a la definición del parámetro medido. La utilización de un filtro, como hacen los luminancímetros, deja el error sujeto al error inherente al mismo. En el caso de la cámara fotográfica, la representación de cada pixel responde a tres componentes, RGB y, consecuentemente se hace necesario trasladar estos tres valores a un valor. En este sentido el estándar sRGB ya establece, como hemos visto anteriormente, una ecuación de conversión basada en unos pesos a cada componente:

$$\text{Brillo} = Y = 0,2162 R + 0,7152 G + 0,0722 B$$

El brillo atribuido a un píxel se consigue mediante una suma ponderada de las componentes RGB. Sin embargo distintas fuentes muestran pesos diferentes a estas componentes y los mismos, además, dependerán de la tecnología de sensado del píxel. Cabe recordar o mencionar que la matriz de píxeles RGB se puede obtener según distintas tecnologías. Una de las más clásicas está basada en la matriz Bayer, con distintas tecnologías, que utiliza un único sensor en el que se distribuyen los píxeles en una matriz donde el verde tiene el doble de píxeles implicados que el rojo y el azul. Otras tecnologías, mediante el uso de filtros adecuados y tres sensores por píxel permiten una distribución equitativa de los tres colores. El segundo sistema podría considerarse más eficiente pero actualmente aún no se ha impuesto por razones de tecnología y coste, además los sensores de las capas superiores actúan filtrando a los inferiores lo que añade otra problemática. Obviamente los pesos atribuibles en unos y otros casos varían según la conversión que realice el fabricante.



**Figura 83** Sistemas de excitación de píxeles

En este trabajo se ha considerado la influencia de esta posible fuente de error y se ha estudiado la influencia de la toma de fotografías en modo color y/o en modo blanco y negro donde es la máquina la que realiza la conversión a brillo. (Una fotografía en blanco y negro no es más que la representación del brillo de cada píxel).

Una de las consideraciones vistas en este estudio se encuentra en que la fórmula de conversión de las componentes RGB en brillo establecida por el estándar sRGB, pese a que las especificaciones de la cámara indican utilizar dicho estándar, utiliza unos pesos, según se acaba de mostrar, que luego, en la cabecera EXIF se muestran diferentes (Figura 84). Los coeficientes mostrados por esta cabecera responden a los especificados en el modelo YCbCr y no a los del estándar sRGB. (Figura 85)



0211	YCbCrCoefficients	RATIONAL
0212	YCbCrSubSampling	SHORT(2)
0213	YCbCrPositioning	SHORT

**Coeficientes de matriz de transformación de espacio de color**  
La matriz de coeficientes para transformación de datos de imagen RGB a YCbCr.

**Figura 84 Coeficientes de matriz de transformación del espacio de color según la cabecera EXIF**

$$\begin{bmatrix} Y \\ C_b \\ C_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.29900 & 0.58700 & 0.11400 \\ -0.16874 & -0.33126 & 0.50000 \\ 0.50000 & -0.41869 & -0.08131 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}.$$

**Figura 85 Coeficientes RGB a YCbCr**

#### 5.7.6.7.5.- Errores ópticos (“vigneteo”, ...)

El viñeteo (“vignetting” en el contexto fotográfico) es uno de los errores contemplados en fotografía y que también afecta a la utilización de ésta para medición.

En principio es un efecto óptico por el que en los bordes de la imagen se producen alteraciones de la misma, unas que afectan a la deformación y otras al brillo. Ésta última es la que nos afecta primordialmente y básicamente se debe a que la luz, al atravesar la óptica del objetivo de la cámara sigue trayectorias distintas según proceda de la zona central o de las de la periferia y a la construcción de las lentes. El mero hecho de tener un mayor recorrido ya afecta.

Este efecto es un efecto que se produce circularmente desde el centro hacia el exterior. Ahora bien, aunque la óptica es circular, la imagen es rectangular con lo que el efecto viñeteo afecta más a las esquinas de las fotografías y variará considerablemente según el fabricante haya diseñado la proyección sobre el sensor. El sensor es rectangular y la imagen se proyecta sobre él, obviamente garantizando al menos que todo el sensor está barrido. Gran parte de los defectos de borde de la óptica no afectan a la parte sensada. Las partes más afectada son las esquinas. (Figura 86)

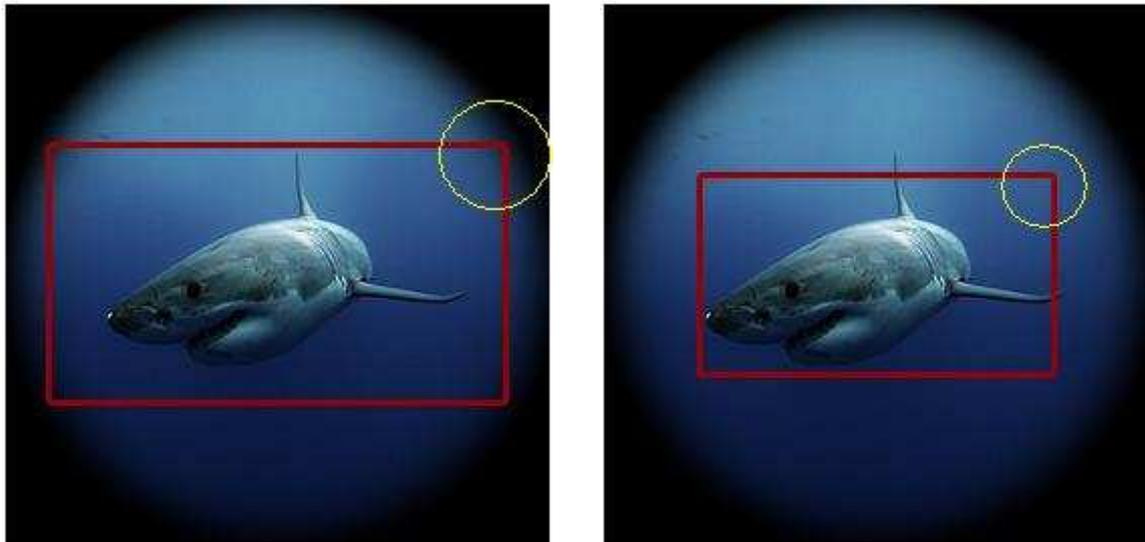
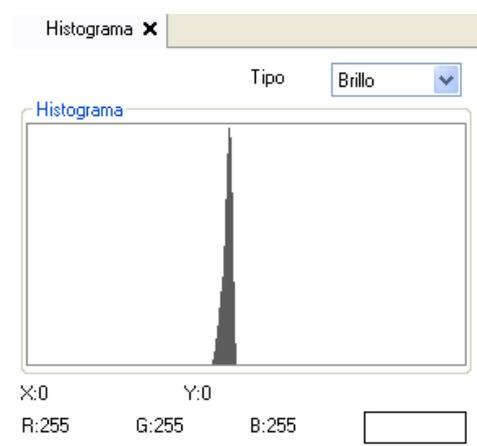


Figura 86 Efecto de borde según área captada (RED.com)

Los efectos del viñeteo se aprecian en el histograma de una fotografía de una superficie homogéneamente iluminada. En principio, si la superficie está homogéneamente iluminada, el histograma debería presentar una única barra vertical en el valor correspondiente a esa iluminación. El efecto viñeteo produce que los píxeles exteriores, y en particular los de las esquinas, reciban una iluminación diferente pese a que la fuente no varía. Este efecto se refleja en que el histograma presenta una figura triangular repartiendo valores próximos al centro. La base de éste triángulo aumentará conforme mayor sea el error de viñeteo. Uno de los efectos que se ha observado en nuestros trabajos ha sido el hecho de la existencia de una relación entre la apertura  $f$  de diafragma y el viñeteo. En nuestras mediciones hemos observado que cuanto mayor sea el número  $f$  (menor apertura) menor es el efecto viñeteo.

En la Figura 87 se observa, al margen de que pueda haber una distribución no homogénea de la iluminación, aunque se procurara que fuera lo más homogénea posible, cómo en el histograma podemos observar el efecto vigneting en el hecho de que el brillo se distribuye en forma circular desde un centro más brillante hacia el exterior.

Esta circunstancia se refleja en que la pendiente en el valor más alto es más brusca que en los valores bajos. Esto se interpreta como que el valor más alto es el más numeroso y la graduación hacia valores más bajos se produce por tanto en el lateral izquierdo.



**Figura 87 Distribución no homogénea.**

Existen trabajos en la línea de compensar o corregir este tipo de errores. (Zheng, Lin, Kambhamettu, Yu, & Kang)

Algunos autores definen diversas causas del error de viñeteo (Understanding lens vignetting, 2013):

*Natural vignetting* appears as a gradual darkening and is primarily caused by light reaching different locations on the camera sensor at different angles (see next section for more). This type of vignetting is most significant with wide angle lenses.

*Optical vignetting* is also gradual, but is primarily caused by intrinsic lens characteristics and shading from the lens barrel itself. It's also what ultimately determines the size of a lens's imaging circle. This type of vignetting is more pronounced at wider apertures, and is strongly influenced by the particular lens design.

*Mechanical vignetting typically happens abruptly and only in the corners, since this is caused by matte boxes, filter rings or other objects physically blocking light in front of the lens. This type of vignetting appears less abrupt at wider apertures and with zoom lenses, it can often be eliminated by using a longer focal length.*

En esta web se confirma así mismo nuestra apreciación acerca de que el efecto de este tipo de error empeora con el aumento del diámetro del diafragma o disminución del número  $f$ .

En el estudio que hemos realizado de este efecto, básicamente no se ha detectado una afección importante de este error para nuestra evaluación de escenas adoptando dos medidas:

- Mantener la el número  $f$  de apertura de diafragma lo mayor posible (menor apertura). La mayoría de nuestras pruebas hemos intentado hacerlas con  $f22$ . Cabe reseñar que esta medida resulta contraria a recomendaciones vistas en otros estudios que utilizan valores de  $f$  bajos en la idea de aumentar la luminosidad del objetivo. En nuestra opinión, amén de la respuesta mencionada anteriormente, los valores bajos de  $f$  añaden errores. También es conocido en el ambiente fotográfico que valores bajos de  $f$  provocan cambios en la profundidad de campo. Este efecto se aprecia en fotografía pues, dando nitidez al elemento enfocado y borrosidad a los elementos no enfocados provocan un efecto de profundidad tridimensional apreciado en fotografía pero que en nuestra aplicación altera los valores que resultan borrosos.
- Evitar los bordes y en particular las esquinas para puntos relevantes de la medición. Afortunadamente resulta evidente que el objeto principal que se desee evaluar se procurará que se ubique en el centro de la imagen.

#### **5.7.6.7.6.- Error de cuantización en valores bajos.**

Este error, que no se puede evitar en la codificación utilizada, se presenta por el número de bits de la información RGB, motivo por el cual hemos indicado que, sin cambiar ésta, no se puede evitar.

En este sentido, dado que la codificación RGB utiliza 8 bits, el rango de codificación va de 0 a 255. Consecuentemente la resolución mínima se fija en  $1/256$  del fondo de escala, es

decir un 0,39% de dicho fondo de escala. El problema se traslada a los valores bajos de medición, lo que redundaría en evitar esta zona, porque un error de un LSB sobre valores altos no tiene el mismo efecto que sobre valores bajos. Llevándolo al extremo, para el valor mínimo “1”, el error de un LSB supone un error relativo del 100%. Si un LSB fuera “1” un error de un LSB provocará que entre un “199” y un “200” haya un error del 0,5% en tanto que entre un “9” y un “10” haya un error del 10%.

La importancia de este error es fundamental dado que, en el cálculo de nuestro error, el que nos interesa es el error relativo a la lectura, no al fondo de escala. En este sentido, por una parte, este error encubre otros errores mencionados y, por otra parte, incide en la necesidad de evitar las zonas bajas.

Actualmente las cámaras digitales tienen valores de 10bits, 12bits,... lo que nos daría errores de resolución de 1/1024 o de 1/4096... Sin embargo, al trasladar esta información a la codificación sRGB, de 8 bits, esta resolución queda truncada al mencionado 1/256. La utilización de la información RAW directamente podría permitir el manejo de las resoluciones anteriores. Sin embargo la complejidad de este formato (que no es estándar y cada fabricante utiliza sus especificaciones propias) así como la no disponibilidad de herramientas como las disponibles para el manejo del sRGB, llevan a que la mayoría de trabajos se realicen con 8 bits. Por otra parte esto se justifica también porque no tendría sentido llegar a milésimas de precisión en unas mediciones de parámetros que por su propia naturaleza presentan variaciones muy superiores. ¿Qué sentido tendría medir la luminancia media de un túnel, de una señal luminosa o de una instalación de alumbrado de un aparcamiento con una precisión de una milésima?

#### **5.7.6.7.7.- Errores de aproximación al EV (valores limitados de Texp, Fn, ...)**

En cierto modo se puede entender que el concepto de EV se discretiza a la hora de su selección por parte de la cámara. Los valores de tiempos de exposición, diafragma e ISO están estandarizados con una serie de valores típicos en fotografía. En este sentido, en la Tabla 5 se observan en columna los tiempos de exposición y en fila las aperturas de diafragma. El valor ISO se selecciona en la celda G1 y se genera una tabla con todas las posibles combinaciones

de que dispone la cámara para adaptarse a un determinado EV resultado de la medición que haga del brillo de la escena (medio, puntual o ponderado).

Por colores mostramos, a modo de ejemplo, cómo, si la máquina ha de seleccionar un EV de 18, dispone sólo de una serie de combinaciones para lograrlo. El algoritmo que utiliza no es conocido y se lo reserva cada fabricante. En todo caso observamos también cómo, si se utiliza el disparo en modo apertura fija, por ejemplo, estos valores se reducen. Así para una apertura f22, los tiempos disponibles más próximos al 18 serían 1/1000, 1/800 y 1/640. Esta tabla se ha hecho sólo con fines ilustrativos y no para cálculos (obsérvese que se han utilizado los valores con el entero exacto (18,xx).

B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z				
				ISO = 100		EV = log2((H* t) - log2(ISO/100))																						
				28,6	30	28,6	30	28,6	11,1	11,3	11,3	11,1	10	9,09	15,4	7,14	12,5	11,1	10	9,09	12	13,8	9,38	11,1				
				1	1,4	2	2,8	4	5,6	6,3	7,1	8	9	10	11	13	14	16	18	20	22	25	29	32	36			
(1/8000)	0,000125	12,97	13,94	14,97	15,94	16,97	17,94	18,28	18,62	18,97	19,31	19,61	19,88	20,37	20,58	20,97	21,31	21,61	21,88	22,25	22,68	22,97	23,31					
(1/6000)	0,000167	12,55	13,52	14,55	15,52	16,55	17,52	17,86	18,21	18,55	18,89	19,19	19,47	19,95	20,17	20,55	20,89	21,19	21,47	21,84	22,27	22,55	22,89					
(1/5000)	0,000200	12,29	13,26	14,29	15,28	16,29	17,26	17,60	17,94	18,29	18,63	18,93	19,21	19,69	19,90	20,29	20,63	20,93	21,21	21,58	22,00	22,29	22,63					
(1/4000)	0,000250	11,97	12,94	13,97	14,94	15,97	16,94	17,28	17,62	17,97	18,31	18,61	18,88	19,37	19,58	19,97	20,31	20,61	20,88	21,25	21,68	21,97	22,31					
(1/3200)	0,000313	11,64	12,61	13,64	14,61	15,64	16,61	16,95	17,30	17,64	17,98	18,29	18,56	19,04	19,26	19,64	19,98	20,29	20,56	20,93	21,36	21,64	21,98					
(1/2500)	0,000400	11,29	12,26	13,29	14,26	15,29	16,26	16,60	16,94	17,29	17,63	17,93	18,21	18,69	18,90	19,29	19,63	19,93	20,21	20,58	21,00	21,29	21,63					
(1/2000)	0,000500	10,97	11,94	12,97	13,94	14,97	15,94	16,28	16,62	16,97	17,31	17,61	17,88	18,37	18,58	18,97	19,31	19,61	19,88	20,25	20,68	20,97	21,31					
(1/1600)	0,000625	10,64	11,61	12,64	13,61	14,64	15,61	15,95	16,30	16,64	16,98	17,29	17,56	18,04	18,26	18,64	18,98	19,29	19,56	19,93	20,36	20,64	20,98					
(1/1250)	0,000800	10,29	11,26	12,29	13,26	14,29	15,26	15,60	15,94	16,29	16,63	16,93	17,21	17,69	17,90	18,29	18,63	18,93	19,21	19,58	20,00	20,29	20,63					
(1/1000)	0,001000	9,97	10,94	11,97	12,94	13,97	14,94	15,28	15,62	15,97	16,31	16,61	16,88	17,37	17,58	17,97	18,31	18,61	18,88	19,25	19,68	19,97	20,31					
(1/800)	0,001250	9,64	10,61	11,64	12,61	13,64	14,61	14,95	15,30	15,64	15,98	16,29	16,56	17,04	17,26	17,64	17,98	18,29	18,56	18,93	19,36	19,64	19,98					
(1/640)	0,001563	9,32	10,29	11,32	12,29	13,32	14,29	14,63	14,98	15,32	15,66	15,97	16,24	16,72	16,94	17,32	17,66	17,97	18,24	18,61	19,04	19,32	19,66					
(1/500)	0,002000	8,97	9,94	10,97	11,94	12,97	13,94	14,28	14,62	14,97	15,31	15,61	15,88	16,37	16,58	16,97	17,31	17,61	17,88	18,25	18,68	18,97	19,31					
(1/400)	0,002500	8,64	9,61	10,64	11,61	12,64	13,61	13,95	14,30	14,64	14,98	15,29	15,56	16,04	16,26	16,64	16,98	17,29	17,56	17,93	18,36	18,64	18,98					
(1/320)	0,003125	8,32	9,29	10,32	11,29	12,32	13,29	13,63	13,98	14,32	14,66	14,97	15,24	15,72	15,94	16,32	16,66	16,97	17,24	17,61	18,04	18,32	18,66					
(1/250)	0,004000	7,97	8,94	9,97	10,94	11,97	12,94	13,28	13,62	13,97	14,31	14,61	14,88	15,37	15,58	15,97	16,31	16,61	16,88	17,25	17,68	17,97	18,31					
(1/200)	0,005000	7,64	8,61	9,64	10,61	11,64	12,61	12,95	13,30	13,64	13,98	14,29	14,56	15,04	15,26	15,64	15,98	16,29	16,56	16,93	17,36	17,64	17,98					
(1/160)	0,006250	7,32	8,29	9,32	10,29	11,32	12,29	12,63	12,98	13,32	13,66	13,97	14,24	14,72	14,94	15,32	15,66	15,97	16,24	16,61	17,04	17,32	17,66					
(1/125)	0,008000	6,97	7,94	8,97	9,94	10,97	11,94	12,28	12,62	12,97	13,31	13,61	13,88	14,37	14,58	14,97	15,31	15,61	15,88	16,25	16,68	16,97	17,31					

Tabla 5 Valores EV y combinaciones de exposición

Lo mismo ocurre en el caso de fijar el tiempo de exposición, nuevamente nos encontramos con un número limitado de diafragmas en el entorno del valor EV que corresponda.

En la misma línea de errores o limitaciones debidos a los valores fijos de tiempos y diafragmas, nos encontramos con que, en principio, los incrementos de tiempo, por ejemplo, deberían seguir una serie múltiplo de dos ya que, dada la expresión logarítmica en base 2 del EV, un paso entero en EV implica un cambio en el doble de magnitud (o mitad).

Por otra parte, si observamos los tiempos ofrecidos por la cámara, la secuencia 1 – 2 – 4 – 8 ... no sigue en 16 sino en 15 lo que altera la cadena de pasos enteros EV.

Finalmente, en la misma línea, los pasos de EV debidos a saltos de diafragma también pueden ser origen de errores si se considera nuevamente la diferencia entre la definición teórica y el valor real.

Los pasos de diafragma se producen por la serie  $f_n$  ( $f_{5,6}$  –  $f_{11}$ , -  $f_{22}$  ...) donde a mayor número  $f_n$  menor es el área de la apertura del diafragma. El número  $f_n$  es la relación entre el diámetro de la apertura y la longitud focal de la lente. En un 50mm, que se utiliza de referencia, un  $f_2$  significa una apertura de 25mm, un  $f_1$  sería 50mm.

f/stop	$f_n$	Diámetro de apertura(mm)	Área de apertura (mm <sup>2</sup> )	Relación 50 mm	Incremento teórico
f/1.0	1	50,00	1963,50	1,00	x1
f/1.4	1,4	35,71	1001,78	1,96	x2
f/2.0	2	25,00	490,87	4,00	x4
f/2.8	2,8	17,86	250,45	7,84	x8
f/4	4	12,50	122,72	16,00	x16
f/5.6	5,6	8,93	62,61	31,36	x32
f/8	8	6,25	30,68	64,00	x64
f/11	11	4,55	16,23	121,00	x128
f/16	16	3,13	7,67	256,00	x256
f/22	22	2,27	4,06	484,00	x512

**Tabla 6** Tabla de áreas para diferentes diafragmas

En la Tabla 6 se observa como la relación de potencias de 2 (1, 2, 4, 8...) en realidad sólo se consigue aproximar con los valores de  $f/n$  establecidos. Este error sólo nos afectará en las pruebas que se hagan basadas en calibrar la curva correspondiente a un EV determinado y luego trasladar los incrementos de EV en potencias de 2. En este caso, para minimizar los errores se debería considerar la relación de áreas y no los incrementos teóricos.

Por otra parte, si se razona la idea de los saltos EV, se entiende que se duplica la cantidad de luz cuando se duplica el área de la apertura. En este sentido se pueden producir

dos errores, uno que los saltos de los números fijados en fotografía no resultan directamente en enteros múltiplos de las áreas, como se puede observar en la Figura 88, y otro que la construcción del diafragma no es un círculo perfecto sino que está construido a partir de láminas que no confieren una circunferencia perfecta.



Figura 88 Diafragmas y área circular

En consecuencia estas variaciones mecánicas pueden resultar también en fuente de errores inherentes a la tecnología de la máquina.

En lo relativo a los tiempos de exposición cabe reseñar que las precisiones en las máquinas mecánicas podían presentar variaciones no despreciables para fines de instrumentación aunque en su momento eran aceptadas para fines fotográficos. Hoy en día, en las máquinas electrónicas, estas precisiones se han mejorado mucho e incluso se consiguen valores intermedios que afinan mejor la obtención del EV perseguido. Así, en la cabecera EXIF se pueden extraer valores de exposición efectivos con decimales (Figura 89).

Campo	Contenido	Tag-ID	Nombre tag
Pentax Version	51.0.0	0000	PentaxVersion
Pentax Model Group	Group 1 (DSLR series & Various Optio models)	0001	PentaxModelGroup
Preview Image Size	448 x 480	0002	PreviewImageSize
Preview Image Length			PreviewImageLength
Preview Image Start			PreviewImageStart
Pentax Model			PentaxModel
Date			Date
Time			Time
Quality			Quality
Flash Mode			FlashMode
Focus Mode			FocusMode
AF Point Selected	Fixed Center	000E	AFPointSelected
Exposure Time	1/13"	0012	ExposureTime
F Number	F22	0013	FNumber

Figura 89 Tiempo de exposición según cabecera EXIF

Si estos errores se podían considerar en las máquinas mecánicas, las máquinas electrónicas los han minimizado y permiten que los otros errores que actualmente se introducen en la utilización de cámaras comerciales para medida de luminancia enmascaren

éstos. En todo caso se hizo un estudio previo de su incidencia, como la hoja Excel de la Tabla 6 y otros cálculos de área del diafragma. Si en su momento se alcanzaran errores muy bajos que no permitieran descartar estos cabría plantear como línea de futuro la consideración de estos errores.

#### **5.7.6.7.8.- Errores del instrumento de calibración (LS-110) y otros (luminarias, led, ...)**

Una de las incertidumbres o fuentes de error más habituales en la calibración de aparatos de medida es el error introducido por el propio instrumento utilizado para calibrar. La mayoría de los trabajos vistos así como el nuestro propio utiliza el luminancímetro LS-110 de Minolta para realizar las mediciones de referencia. En principio, el propio instrumento tiene en sus especificaciones un error del 2% +/- 2 dígitos lo que debe tenerse en cuenta a la hora de evaluar nuestros propios errores utilizando este instrumento.

Aunque el LS-110 especifica dicho error del 2% como “precisión”, ha de tenerse en cuenta que a este error o incertidumbre de medida ha de sumarse otra serie de errores que pueden intervenir en la medición con este instrumento. Así, observando las especificaciones del mismo, se pueden constatar error de repetitividad (+/- 0,2%), dispersión con la temperatura/humedad (+/- 3%), respuesta espectral relativa (6% de la eficiencia CIE), ... Como ejemplo, otros autores hablan incluso de un 6% a un 10% de errores acumulables en el luminancímetro. (Dietmar & Helke, 2007):

*“Minolta declares an accuracy error of 2% at an illumination with an illuminant A for the Minolta LS-100 luminance meter. The Gossen MAVO-Monitor claims an error rate of 2.5% at the same illumination. Both devices are assigned to grade B, as is defined in DIN 5032-714. Therefore the total error (including among other things the deviation of  $V(\lambda)$ , error of indication, error of linearity etc.) of these devices range from 6% to 10%.”*

Una de las cuestiones que afectan a la precisión del LS-110 (y en principio a toda medida) está en el tipo de luminaria utilizada. En este sentido el propio manual del aparato incluye una tabla de compensación con factores de multiplicación para corregir la lectura en función del tipo de fuente de luz. En el contexto urbano el halo luminoso provocado por la iluminación de una ciudad, por ejemplo, no tiene un único tipo de fuente de luz con lo que el resultado será fruto de una mezcla diversa de fuentes de luces y, en consecuencia, la aplicación de los factores de corrección queda relegada a una medición de banco de

laboratorio para un tipo concreto de fuente. En estos momentos, por ejemplo, se está produciendo una tendencia, fundamentalmente por cuestiones energéticas, al cambio de instalaciones de alumbrado por tecnologías LED. Esta situación sin duda tendrá un efecto colateral en la emisión contaminante lumínica de una ciudad pero en la medición de este cambio debería considerarse, en estricto rigor, el error introducido por la herramienta de medición. Probablemente, en tanto que esta incidencia no sea estudiada en mayor profundidad y que los errores introducidos no sean de consideración no despreciable, estos errores quedarán en el margen de tolerancia que este tipo de mediciones requiere.

Es evidente que este error se arrastra a las mediciones realizadas en nuestro trabajo por lo que unos requisitos del orden de un 5% resultan incluso exhaustivos y pretensiosos. En todo caso nuestro planteamiento parte de la idea de una herramienta de evaluación y soporte a la medición de la contaminación lumínica en entornos urbanos.

#### 5.7.6.8.- Tratamiento de la fotografía. Corrección gamma. Linealización.

Como se ha dicho con anterioridad, la información de la cantidad de luz captada por los sensores se puede considerar bastante lineal. Sin embargo, como tanto la respuesta del ojo humano como la de los dispositivos de reproducción como las pantallas CRT no son lineales, los fabricantes aplican correcciones para adaptar la reproducción de la imagen a estas respuestas. Por este motivo, la corrección gamma no es tampoco un concepto único y su valor varía según fabricantes y/o contextos. Nuevamente se nos hace necesario conocer la corrección aplicada en nuestra fotografía para poder compensarla y obtener una respuesta lineal que nos permita utilizar la información con fines de medición.



Figura 90 Respuestas lineal y corregida

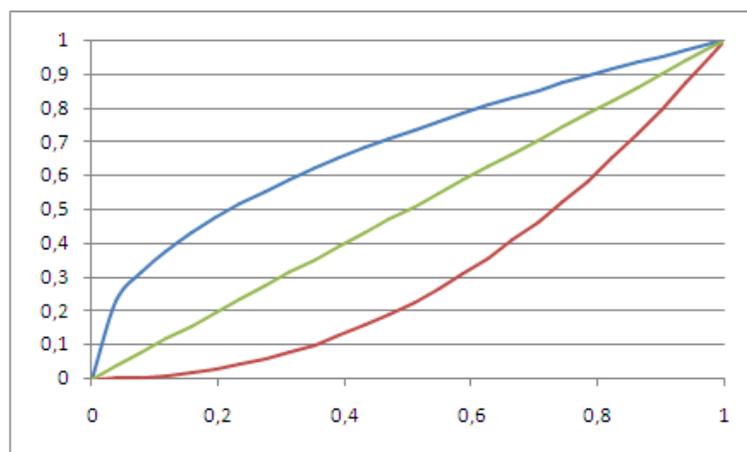
Si no se procede a la corrección, la respuesta humana se saturaría rápidamente (deslumbramiento) y no se discriminaría adecuadamente la zona oscura. Al realizar la compensación, se consigue una mayor discriminación en la zona oscura y una minimización de la zona de saturación.

Esta compensación gamma responde básicamente a convertir la respuesta en una respuesta exponencial similar a la del ojo humano. Nuevamente existen diferentes expresiones de la corrección gamma si bien sus aproximaciones son bastante significativas.

Básicamente la respuesta gamma se expresa como:

$$\text{Salida gamma} = \text{Valor lineal}^{\frac{1}{g}}$$

Con objeto de no alterar los límites del código (0 – 255), previamente se aplica una normalización dividiendo por 255 con lo que los límites (0 – 1) no se ven alterados por la expresión (Figura 91).



**Figura 91 Corrección gamma**

Algunos valores típicos del factor de corrección gamma suelen ser 1,8 y 2,2  
(Figura 92)

PERFIL	GAMMA
sRGB	2,2 (*)
Adobe RGB	2,2
ProPhoto RGB	1,8
Apple RGB	1,8

(\*) El perfil sRGB realiza una compensación gamma más compleja según dos tramos aunque su resultado se asemeja a la expresión convencional con gamma igual a 2,2.

**Figura 92 Valores típicos de gamma**

Aunque se observa el valor 2,2 para el perfil sRGB, la especificación de este perfil no utiliza directamente esta expresión exponencial sino que, como se detalla en otro apartado de este trabajo, la compensación es más compleja y por tramos aunque su resultado se asemeja a dicha expresión con gamma 2,2.

### 5.7.7.- Algoritmo de conversión.

La mayoría de los trabajos analizados referentes a la caracterización de una cámara para obtener la luminancia a partir de la codificación RGB suministrada por la fotografía se basan en la obtención de una función matemática de aproximación a la curva obtenida de fotografías de patrones. En unos trabajos se realiza esta calibración para diferentes condiciones de exposición y se limita el uso a esas condiciones. En otros se calibra una determinada condición de exposición y posteriormente se procede a trasladar el resultado en función de las condiciones nuevas.

La obtención de esta curva obliga a la personalización de una determinada cámara y a desarrollar todo el mecanismo de caracterización. En este sentido uno de nuestros objetivos radica en la obtención de un algoritmo basado en parámetros de la cámara entre otras razones para que un usuario final no tenga que proceder a la caracterización personalizada de su cámara. Por otra parte, tras realizar diversas pruebas en esta línea, no se consiguieron mejorar resultados ya conseguidos por esos trabajos. Cabría elucubrar razones como que las condiciones bajo las que se calibraría la ecuación, al margen de los parámetros de exposición, no se reproducen en los demás casos.

En consecuencia se intentó obtener un algoritmo que se basara en las condiciones de disparo y que permitiera obtener una aproximación al que sigue el fabricante a la hora de asignar la exposición recibida por el sensor a una codificación entre 0 y 255.

Se pueden conseguir precisiones inferiores al 5%, errores de medida incluidos, en la zona central. No es necesario descartar los valores extremos sino que resulta fácil trasladarlos a la zona central simplemente tomando dos capturas más, una a +1EV y otra a -1EV. (o +/- 2EV...)

Dado que la zona de mayor precisión es la central, resulta más preciso realizar tres fotografías, la normal (0EV), otra más 1 o 2 EV y otra menos 1 o 2 EV y sacar los valores de las zonas centrales. De este modo, los valores de la normal que se encuentren en las zonas extremas se desplazan hacia la zona de precisión.

### 5.7.8- Determinación de un método para calibrar nuestra cámara.

Numerosas propuestas y trabajos relacionados con esta temática se fundamentan en la obtención de la función de conversión optoelectrónica de la cámara (OECF) que se define en la norma ISO 14524: 2009 “*Method for measuring opto-electronic conversion functions (OECFs)*” (ISO, 2009)

Esta norma define el OECF como la relación entre las exposiciones (logarítmicas) del plano focal o las luminancias (logarítmicas) de la escena y los niveles de salida digital de un sistema de captura de imagen digital opto-electrónica. El plano focal, es el lugar en donde se encuentra el material fotosensible (película, papel, foto sensor) y en donde la imagen debe adquirir mayor nitidez. (Punto-nodal-plano-focal-y-distancia)

Algunas definiciones de dicha norma son:

*Este estándar internacional describe métodos de test para medir tanto el OECF de la cámara como del plano focal. El OECF de la cámara incluye los efectos de las lentes y destello, en tanto que el del plano focal no.*

*Los efectos en la formación de la imagen pueden variar considerablemente en función de la luminancia de la escena, las diferentes luminancias presentes en la misma y la distribución espacial de éstas luminancias. Estas variaciones pueden ser apreciables por lo que, consecuentemente, sólo se puede determinar un OECF de la cámara para una escena determinada, como, por ejemplo, un patrón de test. Esta especificación permite la determinación de diferentes OECFs basados en diferentes patrones con diferentes relaciones de luminancia pero no considera los efectos de diferentes distribuciones espaciales de luminancias en la escena.*

*Los patrones para los tests OECF de la cámara están diseñados para simular los efectos producidos en la formación de la imagen para una determinada relación de luminancia y una distribución media de luminancias. Sin embargo otras escenas pueden diferir significativamente de esta media. La especificación hace constar específicamente que es necesario tener en mente que la característica OECF medida puede diferir de la presentada por la cámara capturando una escena concreta.*

*Las razones para la inclusión de un método de medición de la cámara OECF son los siguientes:*

*a) el control automático de exposición obligatorio en algunas cámaras se opone (excluye) la determinación de OECF del plano focal;*

*b) el método de medición OECF de la cámara permite la determinación en un solo paso de*

*las características del sistema de cámara para la escena simulada con el patrón de prueba utilizado;*

*c) los valores OECF del plano focal pueden estimarse a partir de valores OECF cámara para las regiones de tonos medios y resalte de la mayoría de las imágenes, siempre y cuando el rango de interés está cubierto por el patrón de prueba utilizado. El plano focal OECF es una característica única de la cámara y no es dependiente de la escena.*

*Se obtendrá un mínimo de nueve series de exposición, como se describe en la cláusula 8, para garantizar la fiabilidad de los datos.*

*El nivel medio de la salida digital se determinará para un área de 64x64 píxeles.*

*Todos los valores logarítmicos serán en base 10.*

*Función de conversión optoelectrónica plano focal plano focal OECF:*

*Relación entre las exposiciones de registro de plano focal de entrada y los niveles de salida digital para un sistema de captura de imágenes digitales opto-electrónico*  
*NOTA Las unidades de medida para esta función son log10 lux segundo.*

*Relación de luminancia de la escena*

*Relación del valor más alto de luminancia al valor más bajo de luminancia en una escena.*

A la vista de estas definiciones, amén del objeto de la norma, se puede observar que la caracterización que se hace de la cámara tiene como objeto el tratamiento de la imagen con fines fotográficos que, a fin de cuentas, es el objeto final de una cámara fotográfica y no su utilización para medición de luminancia.

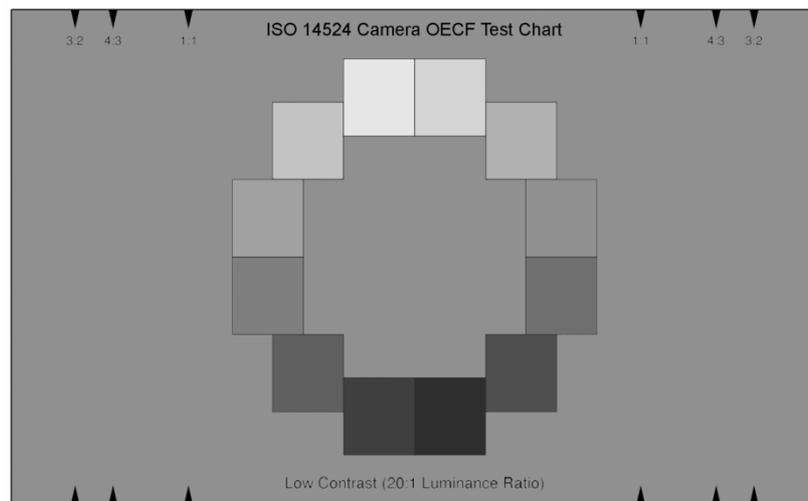
Consecuentemente, si bien esta norma puede ser de gran utilidad y orientación para nuestros fines, no debemos tomarla como base única para nuestro objetivo ya que no garantiza el uso como instrumento de medida como viene a dejar a entender con expresiones como “*Sin embargo otras escenas pueden diferir significativamente de esta media. La especificación hace constar específicamente que es necesario tener en mente que la característica OECF medida puede diferir de la presentada por la cámara capturando una escena concreta.*”

Por otra parte, la caracterización de la cámara la realiza para una determinada condición de exposición con lo que no contempla el traslado o la función de traslado de los datos obtenidos a otras condiciones de exposición, suponiéndose que, en caso de modificarlas, se debería proceder a otra obtención de la OECF.

Sin embargo esta norma nos servirá de base en cuanto a los principios que utiliza tales como la utilización de unos patrones de grises, metodología de medición, ...

En la Figura 93 podemos observar uno de los patrones propuestos por la norma, en este caso de 12 muestras bajo contraste (1:20).

En nuestro caso se han utilizado distintos patrones como los mostrados en la y que se justifican en el desarrollo del trabajo.



**Figura 93 Patrón ejemplo de bajo contraste (20:1) ISO 14524 camera OECF test chart**

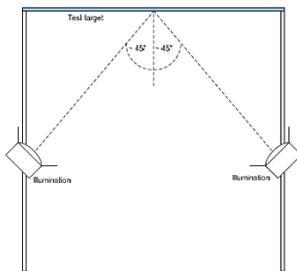


**Figura 94 Patrón base confeccionado para las pruebas.**

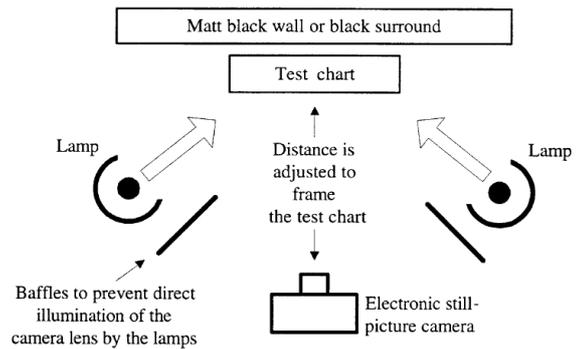


**Figura 95 Patrones base comerciales utilizados**

Para la realización de las tomas y mediciones y tras pruebas propias así como siguiendo las sugerencias de distintas normas, se optó por utilizar un banco de fotografía que permitía la configuración preferente de iluminación por ambos lados.



**Figure 1 — suggested candidate lighting configuration**

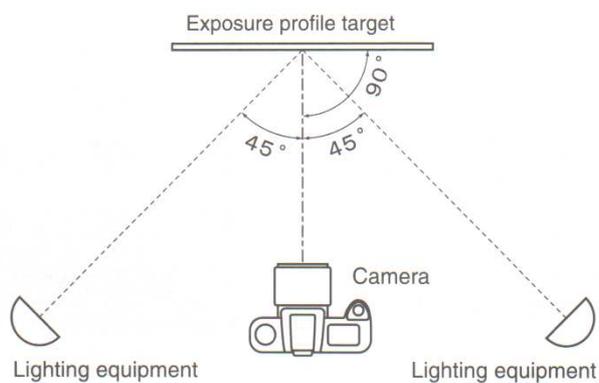


**Figure 3 — Test-chart illumination method**

**Figura 96 Sugerencia comité técnico ISO/ TC42**

**Figura 97 Recomendación ISO 12233**

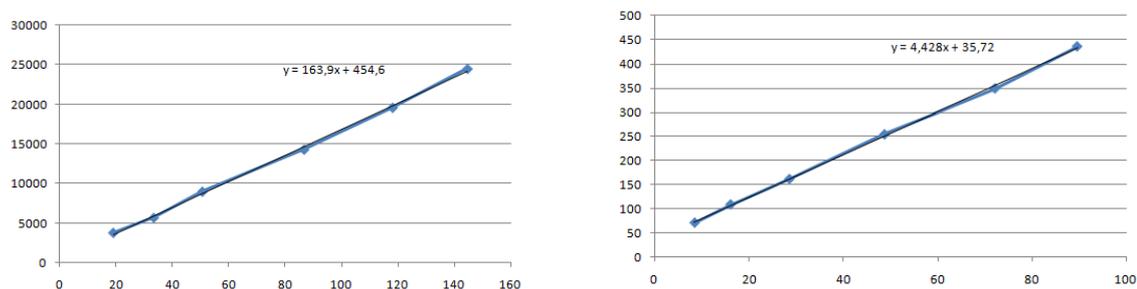
La recomendación de uso del patrón Sekonic utilizado se muestra en la Figura 98:



**Figura 98 Recomendación Sekonic**

Consecuentemente el método utilizado se ha basado en las recomendaciones de estas normas y ha consistido básicamente en realizar las fotografías bajo condiciones de iluminación estables a la par que se realizaban las mediciones con los instrumentos de calibración (luminancímetro, luxómetro, fotómetro,...) con objeto de obtener las funciones de correlación. Cabe reseñar que en nuestro caso no resulta crítico, como en el caso de la fotografía, el conocimiento de los índices de reflexión o la distribución de valores en la escena porque nuestro objetivo no es la obtención de una imagen sino la correlación entre la medición realizada con un luminancímetro patrón y el valor calculado a partir de la fotografía, tomándose ambas medidas simultáneamente.

Sobre la extensa literatura analizada relativa a la linealidad de los sensores se estableció la necesidad de validar esta hipótesis. Para ello se estudiaron las técnicas de compensación utilizadas para adaptar los rangos dinámicos a la percepción de la visión humana (fundamentalmente la corrección gamma) y se realizaron diversas pruebas y mediciones validándose esta aproximación. ( Figura 99)



**Figura 99 Aproximación lineal**

Las primeras pruebas permitieron aceptar un índice de linealidad lo suficientemente elevado para entablar el estudio y la búsqueda de la relación entre los códigos RGB y las condiciones de disparo con la luminancia de la escena. Estas primeras pruebas no tomaron en cuenta estas condiciones de disparo y sólo validaban la existencia de una linealidad aceptable entre el código y la luminancia de los patrones. Los errores relativos con la recta de aproximación obtenida con la hoja Excel no superaban el 5%, incluyéndose los propios errores de medida que se realizaran en estas primeras pruebas.

Una vez establecida esta hipótesis de linealidad se entabló el estudio para conseguir un sistema de medida y evaluación de luminancia a partir de los datos de las condiciones de disparo y del código RGB asignado por la cámara.

El método establecido inicialmente se fundamenta en:

- Copias de seguridad.
- Establecimiento de requisitos.
- Toma de fotografías de patrones de grises con anotación de condiciones de disparo y medición simultáneamente con luminancímetro de los valores de luminancia correspondientes a cada patrón. Repetición de varias medidas iguales para validar las mismas.
- Registro y procesado en hoja Excel de los resultados.
- Estudio y búsqueda de algoritmos de aproximación a las mediciones.
- Estudio de errores aplicables y su compensación.
- Obtención de un algoritmo que cumpla los requisitos.
- Validación del algoritmo obtenido.

#### **5.7.8.1.- Copias de seguridad**

La primera regla que se impuso para el desarrollo de este trabajo fue la realización de copias de seguridad, al menos diaria, de toda la información que se iba generando o recopilando. Para ello se recurrió al uso de pendrives de alta capacidad para las copias de ficheros utilizados diariamente y de discos duros externos de 1TB para copias completas de

directorios con una periodicidad mayor. Cabe reseñar que esta medida resultó muy útil en un momento en que se estropeó el disco duro del portátil de trabajo. De no existir copias de seguridad el daño hubiera sido irrecuperable, por el contrario en escasos minutos se pudo recuperar toda la información en otro portátil.

#### **5.7.8.2.- Establecimiento de requisitos.**

El planteamiento de los objetivos establecidos permitió establecer como requisitos de la propuesta de algoritmo o algoritmos de conversión los siguientes:

- Se buscará una función o algoritmo de conversión de códigos a valores de luminancia con errores en el entorno entre el 5% y el 15% que permita evaluar el orden de magnitud de una determinada fuente de contaminación lumínica, principalmente en entorno urbano.
- El rango posible de medición debe abarcar desde unidades de candela por metro cuadrado (cielo nocturno) hasta más de 20.000 candelas por metro cuadrado (escena al sol diurno). En realidad este segundo punto podrá estudiarse ya que tratándose de medir contaminación lumínica dicho valor se pretende muy elevado para proceder de alumbrado artificial.
- Se diseñará un programa que sirva de interfaz de usuario para obtener los parámetros de luminancia de la escena fotografiada y procesar la información. Dicho programa suministrará así mismo información gráfica y en fichero de los resultados (pseudofotografías, niveles máximos, histograma, ...)
- Se realizarán medidas y comparativas con otros instrumentos utilizados actualmente como por ejemplo el SQM utilizado en astronomía.

Tratándose de un trabajo de investigación y estudio y no de un proyecto comercial, estos requisitos podrán verse modificados o adaptados en función de la evolución del estudio y los resultados de la pruebas y mediciones que se vayan realizando.

No es objeto de este trabajo la obtención de un determinado producto final comercializable que cumpla con unos requisitos de cliente sino el estudio y avance en el conocimiento y propuestas de soluciones para la evaluación y medición de la contaminación lumínica, en particular en entornos urbanos. Consecuentemente, la validación de requisitos se irá produciendo bien por el cumplimiento de los inicialmente establecidos, bien por la justificación y motivación de las modificaciones que se produzcan a lo largo del desarrollo del trabajo.

### **5.7.8.3.- Toma de fotografías de patrones.**

A lo largo de la realización del trabajo se han tomado innumerables fotografías de patrones y escenas tanto para realizar los estudios y algoritmos propuestos como para su posterior validación con la comprobación de resultados.

Las tomas realizadas sobre patrones en banco de laboratorio se efectuaron siguiendo ciertas pautas que garantizaran la menor comisión de errores o interacción de factores externos. En este sentido se puede resumir la metodología utilizada en la mayoría de las tomas realizadas en banco en:

- Eliminación de fuentes externas de luz. Para ello inicialmente se construyó un cajón oscuro revestido de negro con el que se realizaron las primeras pruebas. La utilización del mismo conllevaba ciertos inconvenientes como se constató al evidenciarse que, en particular con valores bajos de iluminación de pruebas, la protección frente a cambios externos no resultaba suficiente. Como luego se fue comprobando, aunque la visión humana no lo percibe, o lo compensa, la iluminación de una estancia con luz natural diurna presenta cambios ante cualquier mínima intervención externa. La propia posición del sol, nubes, ambiente, sombras, ... provocan continuos cambios de modo que una medición de luminancia en dicha estancia está permanentemente produciendo resultados variables. En consecuencia se concluyó que la utilización de este sistema no garantizaba una adecuada toma de patrones con valores de errores aceptables. A raíz de ello se optó por realizar las pruebas en habitación cerrada y durante la noche garantizándose así la mínima intervención de factores externos y mejores condiciones de espacio, accesibilidad y movilidad.

- Mediciones múltiples para cada comprobación. Si bien alguna recomendación como la ISO-14524 llegan a hablar de un mínimo de 9 mediciones para asegurar la fiabilidad de las mismas, expresa la misma idea para evaluar la función de conversión de una cámara concreta como de un modelo, en cuyo caso habla de elegir 9 cámaras aleatoriamente. En nuestro caso no se observaron grandes cambios entre muestras consecutivas iguales lo que nos llevó a aceptar dos tomas como suficientes. Además si se realizaban varias muestras, los tiempos que se tardaba en las mediciones con el LS-110, punto a punto, podían llevar a cambios o errores no previsibles. (variaciones de la luminosidad en el tiempo, variación de la tensión de red, ...)
- Seguimiento de la tensión de red. Al estar alimentadas las fuentes de luz con la red eléctrica, se estableció medir la tensión de red para comprobar que no hubieran grandes fluctuaciones en la misma. En cualquier caso esta medida se realizaba sólo a efectos de comprobación puesto que el valor puntual de una fotografía dada no nos afectaba ya que el valor leído con el LS-110 se registraba en el mismo momento de tomar la fotografía, no siendo significativo su valor absoluto. Si se tomaba lectura de varios puntos del mismo patrón, se llegó a tomar tantas fotografías como puntos con objeto de comprobar que entre dos lecturas consecutivas con el LS-110 no se hubieran producido cambios respecto a una única fotografía.
- Registro por voz de los datos. En la misma línea que el apartado anterior, inicialmente se tomaba la fotografía y se iban anotando los valores que se registraban en los distintos puntos del patrón con el LS-110. Esto provocaba un retraso en el tiempo que podía incluir errores, por ejemplo por variaciones de red antes mencionadas o variaciones propias de la fuente. Por este motivo se optó por registrar los valores con una grabadora de voz de manera que el valor registrado se correspondía con el instante mismo en que se tomaba la fotografía.

#### 5.7.8.4.- Registro y procesado en hoja Excel de los resultados.

De las fotografías realizadas se extraían los siguientes datos fundamentalmente:

- Valores RGB en las zonas centrales de cada patrón o punto de interés. Para ello se utilizó el programa Pentax Digital Camera Utility versión 4.4 de SilkyPix. Una vez

que se empezó a desarrollar nuestra aplicación CVI se constató que los valores coincidían con los que nuestro programa extraía de la fotografía con lo que se utilizaba indistintamente cualquiera de los dos. Al final del trabajo se optó por utilizar más nuestra aplicación CVI porque la utilidad de Pentax nos daba la información de un pixel apuntado por el cursor en tanto que con nuestra aplicación podíamos realizar la media de 9 o 25 puntos circundantes al pixel apuntado por el cursor, reproduciendo mejor la lectura del luminancímetro que mide un ángulo de  $1/3^\circ$  que no responde a un único pixel de la fotografía.

- Valores de exposición (Tiempo de exposición, apertura , ISO, EV efectivo, ...). Para obtener esta información se recurrió al programa PhotoME, de libre distribución, ya que resultó ser el que más información nos daba personalizada por cámara de aquellos que se probaron. Además de los parámetros básicos que se obtienen con cualquier herramienta medio básica como son el tiempo de exposición, la apertura de diafragma y el ISO, esta herramienta nos suministraba otros datos de interés registrados en la cabecera EXIF de la fotografía. Entre estos cabe mencionar el EV efectivo y, en particular, los valores de LV medidos en los distintos segmentos utilizados por la cámara para evaluar los modos de medición.
- Anotaciones. Así mismo se registraban anotaciones particulares de las fotografías, básicamente motivo del disparo (prueba de algo, patrón nuevo, condiciones,...) y datos relevantes como descripción de la escena o condiciones forzadas.

Toda esta información se traslada a hoja Excel para poder realizar y probar los algoritmos que se iban ensayando y probando. Por otro lado, el registro en estas hojas servía tanto de clasificación (han sido años de muestras) como de garantía de que las copias de seguridad que se iban haciendo incluían esta información (la información en papel normalmente no lleva copias de seguridad).

### 5.7.8.5.- Obtención de un algoritmo

Como ya hemos mencionado, uno de los principales problemas a la hora de determinar el algoritmo de conversión entre el código RGB y el valor de luminancia respectivo radica en que el fabricante no busca precisamente esta medida sino la obtención de efectos fotográficos de realces y/o reproducción de una escena. A esta cuestión se suma el hecho de que los resultados fotográficos obtenidos son características que identifican marcas y modelos con lo que los fabricantes no son proclives a suministrar estos algoritmos o funciones de conversión.

Diversos criterios aplicados si son conocidos ya que se suelen atener a normas o convenios como el sRGB. El problema radica en que los datos RGB así obtenidos y adecuados (gamma, linealización,...) no reflejan valores absolutos de luminancia sino valores relativos al rango dinámico de la reproducción, es decir dos fotografías de una misma escena tomadas en condiciones diferentes de iluminación pueden resultar iguales a la hora de reproducirla gracias a los parámetros de exposición tomados. Una fuente de luz determinada con un tiempo de exposición nos daría así el mismo código RGB que una fuente doble con la mitad de tiempo de exposición.

Aunque parecería que simplemente conociendo estos parámetros de exposición (ISO, tiempo de exposición, diafragma, ...) se podrían calcular los valores lumínicos, la realidad no es tan sencilla porque en esta codificación se aplican también otros criterios.

Cuando la máquina calcula el valor del brillo de una escena lo hace, como se ha comentado anteriormente, en base a unas opciones. Así puede calcular el valor de brillo del centro de la escena, de una media de toda la escena o utilizando un algoritmo de gradiente a partir del punto central. La elección de la opción adecuada resulta en exponer adecuadamente la zona central, el conjunto de la escena ó sacrificios de unas partes en beneficio de otras, es lo que se denomina sobreexposición o subexposición de unas partes o de otras. Obviamente las condiciones de disparo de una fotografía son las mismas para todos los puntos de la escena con lo que optimizarlas para una zona o un valor medio resulta en detrimento del resto de zonas.

Una vez que la máquina determina el brillo presente, según el método elegido, es determinante fijarle el código correspondiente a ese brillo. Si hablamos de brillos medios o de interés parecería razonable asignarle al mismo el 50% del código (128 de 256). Sin embargo, como ya se ha mencionado, la respuesta de la visión humana no es lineal y esa codificación no resulta adecuada. Existen mucha literatura al respecto y está bastante aceptado (aunque hay

algunas discrepancias) que el 18% es un valor adecuado para entenderlo como valor medio. Situar un brillo en el 18% del rango permite que el ojo humano perciba más adecuadamente la distribución de brillos superior e inferior.

Una de las partes más problemáticas de este estudio ha sido precisamente la determinación del método para establecer la codificación a un valor conocido de luminancia por parte del algoritmo de la cámara. Para poder establecer la medición se requería de una recta (o curva conocida) y de un punto de la misma. Resultaba fundamental conocer el rango dinámico de la cámara, límites entre valor mínimo y valor máximo codificados, para, a partir de dicha curva, poder delimitar los valores correspondientes a cada código RGB.

#### **5.7.8.6.- Valores de exposición y brillo EV y LV.**

En la fotografía clásica, el fotógrafo dispone de diferentes parámetros que puede cambiar para adecuar la exposición de la fotografía al brillo de la escena o parte de la escena que desea fotografiar. Estos parámetros son básicamente:

- Tiempo de exposición o tiempo en que está abierto el obturador dejando pasar la luz al sensor o película.
- Apertura de diafragma o área de la apertura que deja pasar la luz.
- ISO o sensibilidad de la película. En fotografía digital el ISO equivale a un valor de amplificación. Si un sensor adquiere un determinado valor para un ISO base (por ejemplo 100), siendo esta información un parámetro eléctrico, amplificando, o a veces atenuando, este valor, se consigue el mismo efecto que tenía elegir una película de una determinada sensibilidad. La diferencia básica radica en que si antes una película tenía una determinada sensibilidad para todas las fotografías tomadas con ella, ahora se puede modificar el ISO para cada fotografía.

Modificando estos tres parámetros, el fotógrafo puede variar el rango dinámico de la fotografía adaptándolo a la luminosidad de la escena a fotografiar. Cuantitativamente sería lo mismo disparar una fotografía, para un mismo diafragma, con un ISO de 100 y un tiempo de exposición de 2 segundos que con un ISO de 200 y un tiempo de exposición de 1 segundo. Sin embargo desde otros puntos de vista estas condiciones no son indiferentes. Por ejemplo para escenas en movimiento interesa que los tiempos de exposición sean lo menor posible

para evitar escenas movidas. En otras ocasiones para provocar profundidades de campo más o menos acentuadas se juega con el diafragma. Igualmente escenas con poca luz requerirán altos niveles de sensibilidad (ISO).

Por otra parte, a diferencia de las máquinas electrónicas modernas, las cámaras no siempre tenían incorporado el fotómetro para medir la luminosidad de la escena. El fotógrafo disponía de dicho instrumento como complemento de su equipo y con él podía realizar la medición de la luz presente en la escena. Esta medición podía hacerla de distintas maneras. Podía medir la luz incidente en la escena o en la zona de ésta que deseaba captar optimizadamente. En este caso debía asumir un coeficiente de reflexión medio de éstas.

También podía medir la luz reflejada por éstas en cuyo caso mediría directamente la luz recibida por la cámara. En cualquier caso se hacía necesario adecuar los parámetros de la cámara para que la escena o zona de ésta quedara adecuadamente expuesta. Si el fotógrafo no disponía de dicho fotómetro también podía recurrir a unas tablas, más o menos detalladas, que indicaban las condiciones más o menos óptimas en función de luminosidades habituales. Como ya se ha comentado, para una misma situación de iluminación, se podía recurrir a distintas combinaciones de parámetros. Así pues se requería una unidad de medida para indicar las condiciones de alumbrado. Esta unidad se estableció como LV (Light Value) y dio lugar al EV (Exposure Value).

El LV es un indicador de equivalencia de luminosidad de una escena y se podía resumir su origen en tablas similares a la siguiente y que solía venir con en las propias cámaras y/o en los carretes de fotografía. Estos valores venían orientados para un valor de ISO base (generalmente 100) y el fotógrafo debía aplicarle el desplazamiento adecuado en caso de utilizar un ISO diferente. Dada la escala logarítmica en base 2, los incrementos o decrementos de 1 EV respondían a valores doble o mitad, respectivamente, de ISO.

EV	Descripción	LUX
16	Sol directo sobre nieve o arena	128k
15	Luminoso o sol con neblina, con sombras	64k
14	Poco cargado, sol con neblina, con sombras	32k
13	Luz difusa, nubes, sin sombras	16k
12	Nublado denso, sin sombras	8k
11	Amanecer, atardecer	4k
10	Puesta de sol	2k
9	Paisajes, 10 minutos antes de amanecer o tras atardecer	1k
8	Night: sports stadium, brightly lit cityscape	500
7	Calle nocturna iluminada. Bosque denso, lluvioso	250
6	Noche: ferias, parques de atracción	125
5	Noche: alumbrado interior, sujetos iluminados por fogatas	60
4	Noche: bajo las farolas, edificios iluminados, monumentos, etc.	30
3	Noche: fuegos artificiales.	15
2	Noche: Vela a 20 cm	8
1	Noche: horizonte iluminado en la distancia	4

Figura 100 Escala EV

A partir de estos valores con los que se obtenía una exposición más o menos adecuada a dichas situaciones con una sensibilidad de referencia de ISO 100, su expresión numérica se determinó de modo que permitía las equivalencias en las variaciones de diafragma, tiempo y sensibilidad:

$$LV = \frac{f^2}{t} \frac{100}{ISO}$$

Por su parte el término EV se expresa, independientemente de la sensibilidad, como:

$$EV = \frac{f^2}{t}$$

de donde:

$$LV = EV \frac{100}{ISO}$$

Por otra parte es evidente que este valor dependerá del brillo de la escena y, admitiendo la linealidad, de las características del sensor. En consecuencia, el EV tendrá una expresión relativa a estos parámetros:

$$EV = \frac{B}{k} S_x$$

donde B es el brillo de la escena en  $\text{cd/m}^2$ ,  $S_x$  la relación entre el ISO elegido y 100 y k una constante que dependerá de la máquina (valores típicos de esta constante suelen moverse entre 10 y 14) y que permiten adecuar la expresión del brillo en  $\text{cd/m}^2$ . En el caso de Pentax esta constante suele ser 14. En todo caso su valor, dados los otros términos implicados en las expresiones, suele ser fácilmente obtenible empíricamente.

A partir de estas expresiones puede obtenerse el brillo B de los valores de exposición fijados. Ahora bien, este brillo B responde al utilizado como referencia por la cámara para fijar dichos valores y, como se ha dicho, puede proceder de diversos criterios como el brillo central, brillo medio de varios segmentos o brillo ponderado desde el centro hacia afuera.

En consecuencia, para poder determinar un algoritmo de conversión del resto de píxeles de la toma, se hace necesario conocer qué código asigna la cámara a este brillo. Asumiendo una recta en el resto de la codificación y determinando su pendiente, si conocemos un punto de la misma se podrá determinar la expresión de ésta.

### 5.7.9.- Algoritmo propuesto.

La mayoría de los trabajos analizados relacionados basan la obtención de la curva de conversión en la realización de una tabla de valores medidos y códigos asignados a partir de la cual se genera una función matemática de aproximación, generalmente una expresión de grado n. En nuestro caso proponemos en una primera fase linealizar la respuesta con objeto de poder obtener una recta de aproximación como base a una medida. Si se consigue esta respuesta lineal, la función de conversión resulta en una simple escala clásica de medición.

Tras diversas mediciones y utilizando la hoja Excel mencionada anteriormente, con los datos extraídos de las fotografías realizadas con la plantilla de 8 niveles de grises, desde el blanco al negro, y aplicando los criterios de corrección gamma sRGB se obtuvieron resultados aceptables en el rango de errores inicialmente establecido (inferiores al 15%). La mejor respuesta se obtuvo en las zonas centrales por lo que se descartaban los extremos (zona baja oscura con errores de ruido y zona alta brillante con errores de saturación). Estos resultados eran acordes a los obtenidos en otros estudios ajenos en los que se evidenciaba que las zonas

bajas están sujetas a ruido y las altas a saturación como principales causas de esta pérdida de linealidad en las mismas. Aceptando la zona lineal el problema no está tanto en obtener la recta sino en desplazarla al rango dinámico real de la escena captada ya que los valores 0-255 son relativos, como ya se ha anticipado.

Los primeros estudios se centraron en intentar calibrar una condición de exposición determinada y posteriormente proceder al traslado de esta respuesta en función de las condiciones de tiempo de exposición, diafragma e ISO de otras tomas. Esta primera aproximación dio resultados aceptables en el rango mencionado (15%), sin embargo no se conseguían mejoras sustanciales, trasladaban los errores de la medida de calibración a las demás medidas y, además, suponían un proceso de calibración específico para una determinada toma de referencia lo cual se alejaba del propósito inicial de conseguir una calibración cómoda y general.

El estudio de los histogramas de las muestras realizadas permitió observar que la cámara codificaba de 0 a 255 un rango de 6 EVs. Esta apreciación supuso un gran avance puesto que con ello se obtiene la pendiente de la recta con independencia de otras consideraciones. Así, 6 EV suponen un incremento de brillo de  $2^6 = 64$  entre el valor mínimo y el máximo. Desgraciadamente el valor mínimo, aunque codificado como 0, no tiene dicho valor 0 en la escena real sino que es tan bajo que no llega a alcanzar el código del 1.

Sin embargo, disponiendo de la pendiente, bastaría con tener un punto de la recta para deducir su expresión:

$$\text{Brillo de un pixel} = \text{Brillo mínimo} + \text{Pendiente} \times n$$

donde “n” sería el código de 0 a 255 respectivo de un determinado pixel.

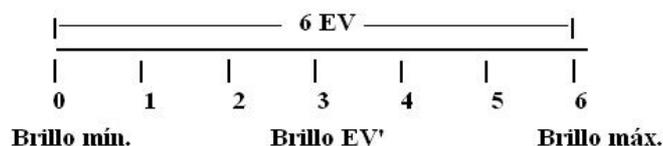
Este punto a evaluar que pertenezca a la recta se consigue a partir del código que dé la máquina al brillo medio obtenido de la expresión de EV y que pertenecerá a la curva.

Según distintos trabajos estudiados este valor medio no es fijo para todas las máquinas y oscila entre valores sobre 90 y los 128 de la mitad del rango.

Las teorías que defienden el 18% como valor medio efectivo a la respuesta del ojo humano dan el código 118 como asignado al mismo. Su obtención se puede deducir como que el 18% de 255 es 45,9 y, si a este valor le aplicamos la corrección gamma tras normalizarlo nos da 117,646 que toma el entero más próximo en 118.

De este modo se sitúa el brillo medio (percibido por el ojo humano, no el medio numérico) en un valor próximo a la mitad de la escala. Ahora bien, como este 18% no está consensuado del todo, dependiendo de otros criterios, se proponen valores diferentes, entre 110 y 128.

La escala logarítmica en base 2 de la distribución de los EV nos permite prever que el valor máximo obtenido en los 6EV será una potencia de 2 referida al valor de referencia por el brillo de la misma.



**Figura 101 Distribución brillos en 6 EVs**

Partiendo de que el brillo correspondiente a EV', que es como llamaremos al EV correspondiente al valor medio, es un porcentaje (de entrada un 18%) del brillo máximo, si se consigue determinar el código asignado y el valor de luminancia correspondiente, se podría obtener el valor máximo ya que los incrementos de EVs se traducen en incrementos de  $2^{EV}$  del valor de brillo.

$$\text{Brillo máximo} = \text{Brillo EV}' \times 2^{6-A}$$

Donde queda por determinar A que se correspondería con la posición de EV' en el tramo de 6 EV. Si esta posición fuera en el centro ( $\pm 3EV$ ) el brillo máximo sería 8 veces el brillo de EV' pero este no es el criterio seguido por los fabricantes. Determinar este valor es precisamente nuestro objeto principal ya que de él se extraería directamente el valor máximo, y en consecuencia el mínimo del rango.

En este punto es donde, tras diversos intentos y pruebas, se consiguió minimizar los errores suponiendo una codificación inicial del EV' correspondiente al valor de exposición



errores intrínsecos. En la Figura 102 se observa el problema indicado de los extremos. Para solventar este inconveniente se probaron aproximaciones. La propia especificación sRGB establece un límite inferior al condicionar la conversión a un valor mínimo de RGB. Por otra parte, en la cabecera EXIF se observa un valor mínimo para el negro de 48 (en un rango de 4096 para un RAW codificado con 12 bits). Trasladado ese 48 sobre 4096 al rango de 256 nos da 3. En varias aproximaciones que no tenían esta circunstancia en cuenta se observaba que el error aumentaba excesivamente en las zonas próximas. Tras algunas pruebas se obtuvo el mejor resultado sumando este 3 al código. Sin embargo esta suma, cuando los valores eran próximos al cero podía implicar variaciones de hasta un 100%. En este sentido se condicionó aplicar esta corrección por encima del 3. En cualquier caso tampoco resultaba excesivamente crítica esta apreciación ya que se había partido de la idea de no trabajar en las zonas bajas y altas.

Varios estudios analizados así como las propias mediciones efectuadas muestran que la mayor linealidad se encuentra en la zona central del rango. En su mayoría, estos estudios centran gran parte de su esfuerzo en compensar y justificar las zonas extremas con objeto de obtener la mayor linealidad posible o, incluso en algún caso, descartar estos extremos. Por nuestra parte, en lugar de perseguir corregir estos extremos máximo y mínimo donde se producen los mayores errores, se buscó una alternativa más simple. En este sentido, según las pruebas hechas, así como en el estudio realizado sobre el hecho de que lo recibido por el sensor no es lo que hay presente en la escena sino en la parte que se le deja pasar jugando con el valor de exposición (EV) utilizado, la alternativa consiste en realizar tres tomas. Una de las tomas se realiza con el EV medido con lo que en su centro se tiene, en su máxima linealidad, la zona central del rango dinámico de la escena. Las otras dos, una se toma con +1EV (o +2EV) y la otra con -1EV (o -2EV). De esta manera se trasladan a la zona central los extremos del rango dinámico de la escena y, consecuentemente, se consigue su medición en la zona de mejor linealidad.

Cabe reseñar que una de las aplicaciones posibles de esta herramienta sería la determinación de valores máximos de una escena según determinan las ITC 02 y 03. En este sentido el proceso consistiría en fijar dicho máximo en una zona central del rango de la fotografía de manera que todos los valores del histograma resultante deberían de quedar por debajo de este valor. La mera observación del histograma permite pues determinar si se ha

superado o no el máximo mencionado. Es importante destacar que el único valor que deber reflejar una precisión aceptable es este máximo. Para el resto de valores inferiores (y superiores) pertenecientes a la escena no nos interesa la precisión pues lo único que perseguimos es determinar que no superan un máximo y no su valor.

En un programa como el que hemos realizado en CVI se podría realizar una pseudofotografía con dos colores, uno base con todos los valores inferiores al máximo permitido y uno diferente para aquellos en los que se supera el mismo. En el momento en que aparecieran zonas con el segundo color se detectaría la anomalía e incluso se podría realizar una medida sobre las mismas con otros instrumentos de precisión como los indicados por ahora por la normativa vigente (luminancímetro y luxómetro). Todo ello sin intervención de la apreciación subjetiva del usuario. En la práctica resulta más operativo utilizar una gama de colores pues, aunque el tema en sí no es de nuestro interés, la fotografía en dos colores no permite determinar con facilidad las zonas ya que todo lo que queda bajo el máximo resultaría en el mismo color y la escena desaparecería. Por ejemplo, una fotografía de este tipo donde todos los valores fueran inferiores al máximo sería una fotografía toda del mismo color. Si algún punto resultara por encima del máximo se vería en mitad de la escena pero como el resto de la misma no es distinguible no sería evidente ubicarlo. (Figura 103)

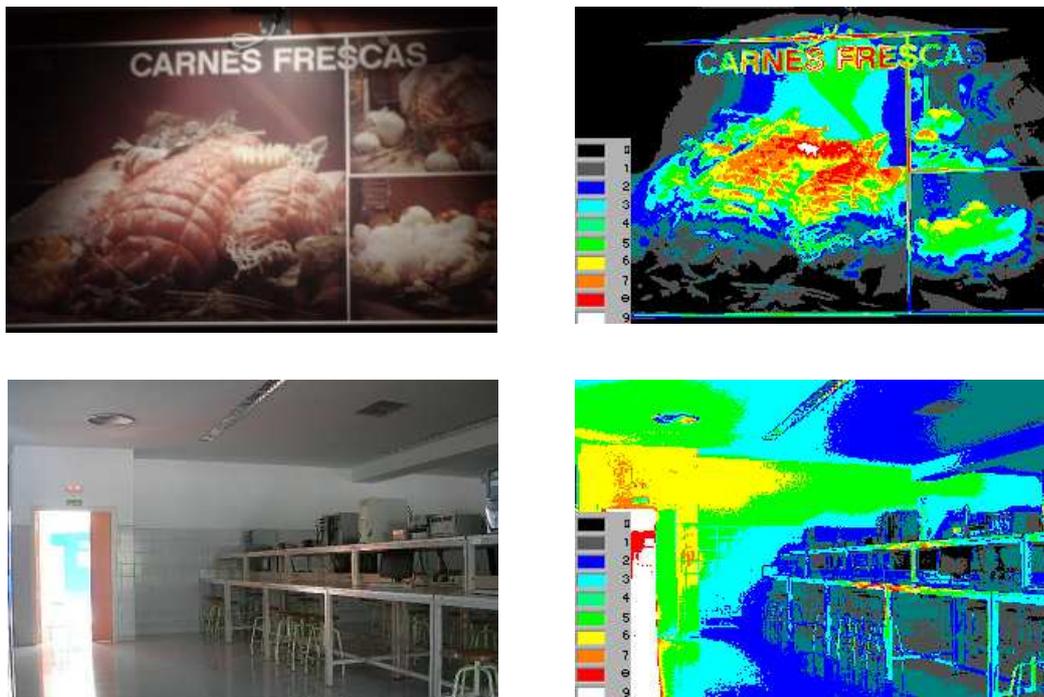


Figura 103 Ejemplos de pseudofotografías de colores

## **5.7.10.- Validación de la propuesta.**

### **5.7.10.1.- Introducción.**

Tanto para validar los resultados como para facilitar los cálculos y mediciones durante las diversas pruebas realizadas se ha ido desarrollando y utilizando una herramienta software o programa en CVI. Así mismo, durante las pruebas y mediciones se ha utilizado una hoja de cálculo Excel para los cálculos y gráficos.

El objetivo de estas herramientas software ha sido el cálculo y obtención tanto de las propuestas de calibración como de las pseudofotografías en mapas de colores. Así mismo, el procesamiento software de la información ha permitido el tratamiento de todos los píxeles de la imagen total o parcialmente (valores medios, zonas, mínimos, máximos, ...)

Inicialmente, para el manejo de la gran cantidad de datos que se obtenían en las múltiples medidas que se realizan, se utilizó la hoja de cálculo Excel. Esta herramienta facilitó el registro y almacenamiento de los datos así como, fundamentalmente, los cálculos y pruebas así como el trazado de gráficas y tablas.

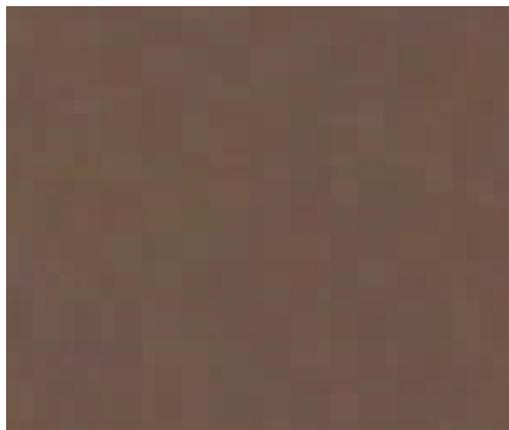
Una vez que se validaban propuestas o para pruebas determinadas se trasladaba al programa CVI el modelo lo que permitía añadir resultados e imágenes a la validación. Así mismo, el programa también tuvo su utilidad en sentido contrario, es decir, desde el mismo se pudo extraer información que se trasladaría al programa Excel, por ejemplo valores medios en torno a un pixel.

### **5.7.10.2.- Programa CVI.**

Inicialmente el objetivo del programa CVI fue doble, por una parte el acceso a todos los píxeles de la fotografía. Una vez que se obtuviera el acceso a éstos se abría la puerta a cualquier tratamiento que se quisiera realizar como localización de máximos y mínimos, valores medios, aplicación de correcciones como linealización gamma o cualquier otra. Por otra parte, el panel de usuario del CVI ofrecía una herramienta muy útil a la hora de disponer de un interfaz de usuario fácil de programar y que nos permitiera la visualización de las

fotografías y resultados de las acciones que se realizaban, todo ello con el uso del ratón directamente. Las aplicaciones más inmediatas que se realizaron fueron:

- Obtención de una pseudofotografía de niveles. A partir de establecer unas franjas de niveles, el programa determina en qué franja se encuentra cada pixel y sustituye su valor por el del color asignado a esa franja.
- Obtención de una fotografía de brillos, que en realidad viene a ser la fotografía que llamamos en blanco y negro.
- Obtención de valores de diferentes cálculos. A lo largo de las pruebas se requería conocer el valor de algunas ecuaciones o valores concretos para diferentes acciones. Realizar estas acciones con una calculadora, resultaba tedioso y poco eficiente, en tanto que trasladarlo al programa resultaba inmediato y de gran eficacia.
- Programabilidad de la zona de cálculo. La medición de un pixel aislado no resultaba un reflejo real en el marco de nuestros objetivos. Un luminancímetro tiene un ángulo de apertura de la medición muy estrecho pero que en ningún caso equivaldría a un pixel aislado de la escena. Según la fotografía refleje una zona de colores no saturados, podemos encontrarnos (se puede observar aumentando varias veces el zoom de una fotografía hasta ver los píxeles) con que los píxeles difieren de los que les rodean en color y brillo. (Figura 104)



**Figura 104** Píxeles diferentes

Si se realizan los cálculos sólo con un pixel, los errores que se obtienen dependiendo del pixel seleccionado pueden ser considerables. La mejor manera de paliar este efecto y de asemejar la medición a la que realiza el luminancímetro que integra un área correspondiente al ángulo que tenga es tomar el valor medio de los píxeles que rodean al pixel en cuestión, incluido él mismo. Para ello el programa C supone una herramienta de gran valor que nos permitía obtener fácilmente el valor medio de un pixel y de la matriz que le rodeaba. En nuestro caso se hizo para una matriz 3x3 y para 5x5.

- Interfaz gráfico para el acceso a los puntos de la fotografía. Con el interfaz de usuario del CVI se disponía de una herramienta muy útil a la hora de acceder gráficamente a los puntos de la fotografía mediante el uso del ratón pudiéndose así realizar cálculos y acciones sobre estos directamente.
- Obtención del histograma de la fotografía. Otro resultado muy sencillo de obtener con la aplicación informática fue el histograma de las fotografías. El mismo nos permitía realizar comprobaciones y comparativas con los histogramas de otras aplicaciones. Así mismo resultó de gran utilidad a la hora de determinar el posicionamiento y anchura del rango dinámico de la fotografía.
- Otros. El programa resultó de gran utilidad a la hora de realizar multitud de comprobaciones, cálculos y todo tipo de pruebas que se realizaron en tanto que cualquier acción que se deseaba realizar se trasladaba fácilmente al programa y al interfaz de usuario o panel frontal.

- Validación de la propuesta. Una vez que el programa CVI resultaba operativo, se utilizó para validar las propuestas de algoritmos de aproximación en tanto que con este programa se podían realizar las mediciones resultantes con uso del ratón sobre la fotografía.

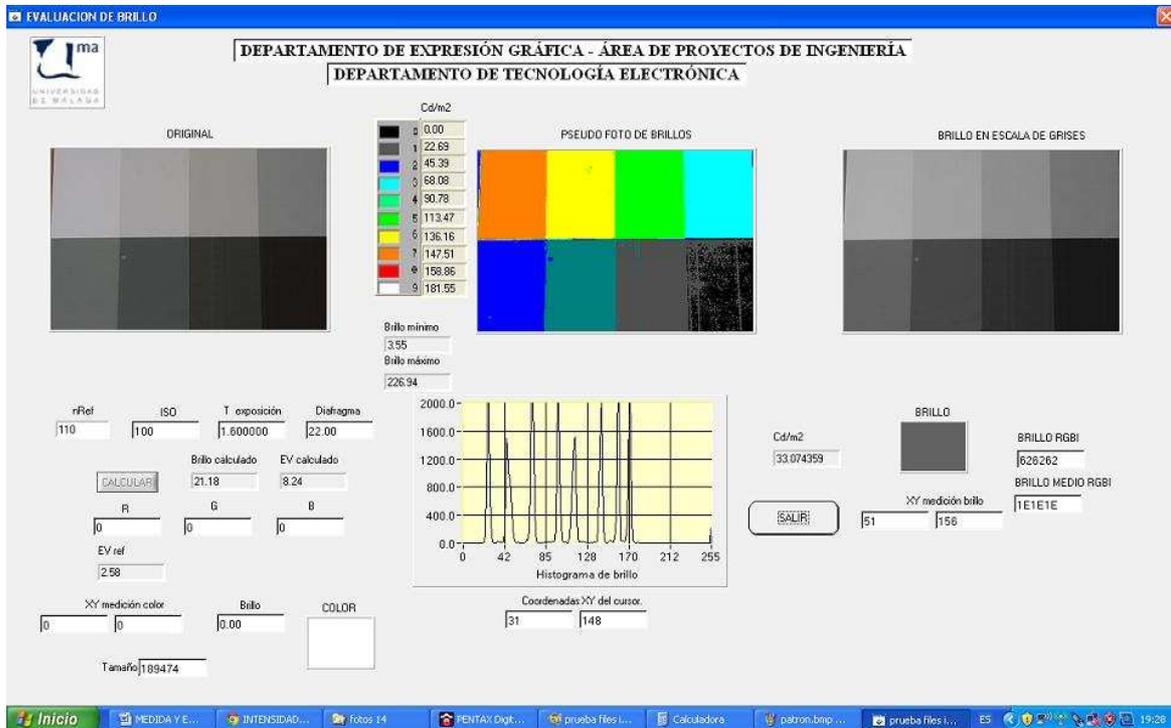


Figura 105 Panel de usuario de la aplicación CVI

Una de las ventajas principales de la utilización de esta herramienta fue la facilidad con que permite la introducción de elementos en el panel y su proceso desde el programa gracias al editor de paneles y a las librerías para su utilización. A lo largo de las prueba resultaba inmediato añadir algún parámetro que se quería evaluar o probar en el panel y ejecutar dichas pruebas. (Figura 105)

### 5.7.10.3.- Hoja de cálculo Excel.

El proceso seguido consistía en realizar la fotografía a evaluar, medir en ella determinados puntos prefijados con el luminancímetro calibrador, por ejemplo las zonas centrales de cada plantilla, extraer los valores RGB de las mismas zonas mediante un programa gráfico (el Digital Camera Utility de Pentax o nuestra aplicación CVI) e implementar los procesos de corrección y algoritmos en prueba para esos puntos así como evaluar los resultados (cálculo de errores, gráficas,...).

Para este proceso la utilización de una hoja de cálculo resulta idónea. A partir de la introducción en determinadas celdas de los valores RGB respectivos y de las condiciones de disparo de la fotografía (tiempo de exposición, diafragma, ISO, ...) así como de determinadas constantes (valor de gamma, constante K, ...) se obtenían las restantes columnas con las correcciones realizadas (linealización, normalización,...) así como los resultados del algoritmo en prueba y los errores obtenidos, su media, su máximo etc... Igualmente resultaba inmediato obtener las gráficas necesarias e incluso, a partir de las mismas, ecuaciones de aproximación (exponenciales, logarítmicas, lineales, ...).

Este proceso de pruebas y validaciones de los algoritmos que se iban ensayando y comprobando conllevaba esa labor repetitiva y a veces tediosa así como sujeta a errores de realizarse manualmente. Por todo ello resultó de extremada utilidad la utilización de la hoja de cálculo Excel donde poder introducir los parámetros adquiridos y los extraídos de la fotografía para su procesado según los algoritmos que se estuviera probando.(Figura 106)

Figura 106 Hoja Excel para cálculos y resultados.

En la Figura 106 se ve un ejemplo de una parte de las hojas Excel utilizadas. En este ejemplo, en la casilla F3 (en rojo) se marca el código de 0 a 255 a probar como valor medio para obtener la mejor aproximación. En las casillas circundantes se insertaron las ecuaciones para obtener la codificación correspondiente a este código trasladada a partir de asignar el número de la casilla F3 al EV efectivo calculado (columna F). A partir de este valor de EV' se obtenía el valor de brillo máximo del tramo de 6 EV como potencia de 2 de esta diferencia (columna V). Obtenido este máximo se obtiene el mínimo dividiendo por 64 (2<sup>6</sup>) éste. El brillo linealizado de un pixel determinado (columna T) se obtiene con la distribución de 0 a 255 de este rango de 6 EV con la corrección mencionada de +3 para valores superiores a 3. En todo caso las zonas de interés serían las centrales. En el programa CVI este algoritmo se aplicaba a 9 o 25 puntos (matriz 3x3 o 5x5 circundante al pixel de interés) y se obtenía la media.

Así mismo se introducían las medidas hechas con el luminancímetro para cada punto a medir y sus valores RGB extraídos de la imagen. La hoja obtenía los valores calculados de brillo y el error resultante en porcentaje (columna amarilla).

### 5.7.11.- Mediciones y resultados.

A lo largo de este trabajo se han realizado múltiples mediciones y comprobaciones de resultados de los diferentes algoritmos y pruebas que se fueron proponiendo. Estas mediciones y comprobaciones de resultados se efectuaron utilizando los programas (aplicación CVI y hoja Excel) antes mencionados.

Como resumen final de las mismas se han mantenido dos de las propuestas evaluadas.

En las hojas finales, de las que al final de esta tesis se muestran varios ejemplos, se mantuvieron tanto la propuesta final basada en la distribución de 6 EVs como la primera que se había propuesto basada en la distribución lineal entre un brillo mínimo y uno máximo. Si bien se mantuvo la segunda a efectos comparativos, se pudo constatar como la propuesta final obtenía resultados mucho mejores.

Una vez que se obtuvieron los resultados previstos a partir de los patrones se procedió a realizar varias pruebas de campo para constatar la validez de la propuesta en entornos reales y no sólo de laboratorio.

En los apartados siguientes se muestran algunas de estas pruebas realizadas en campo.

### 5.7.12.- Validación pruebas de campo

Tras validar el algoritmo en banco de pruebas con patrones, se procedió a realizar varias pruebas de campo con objeto de validar su aplicación en entornos reales.

De entre las varias pruebas que se realizaron las siguientes reflejan un resumen ilustrativo de las mismas:

- Comparativa con mediciones con SQM (contexto astronómico)
- Comparativa con mediciones con LS-110 alumbrado calle (alumbrado vial)
- Comparativa con mediciones con LS-110 parque (alumbrado zonas ocio)
- Comparativa caso eventos (Feria Málaga 2015) (evento excepcional)
- Comparativa con anuncios publicitarios (otras fuentes urbanas)

### 5.7.12.1.- Comparativa con mediciones con SQM. Mediciones y pruebas.

Una de las pruebas que se establecieron para validar la herramienta en distintos contextos fue la de contrastar la medición realizada con el SQM y la realizada con la herramienta, en base al algoritmo propuesto.

El SQM utiliza la unidad “ magnitud / arc sec<sup>2</sup> ”, utilizada en el contexto de astronomía. El fabricante suministra una fórmula para su conversión a luminancia en candelas por metro cuadrado:

$$cd / m^2 = 10.8 \times 10^4 \times 10^{(-0.4[mag / arc \text{ sec}^2])}$$

La prueba realizada consistió en tomar una medida con el SQM que dio un valor de 18,27 mag / arc sec<sup>2</sup> y realizar una fotografía de la bóveda celeste, con un objetivo ojo de pez, que, procesada con la herramienta, dio una medida de 5,041 x 10<sup>-3</sup> cd/m<sup>2</sup> en el cénit.

Las condiciones del cielo de noche son extremas en el sentido que llevan a la cámara a valores muy en el límite bajo de su rango dinámico. En nuestro caso se tuvo que fijar un ISO de 1600, un tiempo de exposición de 30 segundos y un diafragma de f/14.

Aplicando la ecuación del SQM :

$$10.8 \times 10^4 \times 10^{(-0.4 \times 18,27)} = 5,3140 \times 10^{-3} \text{ cd} / \text{m}^2$$

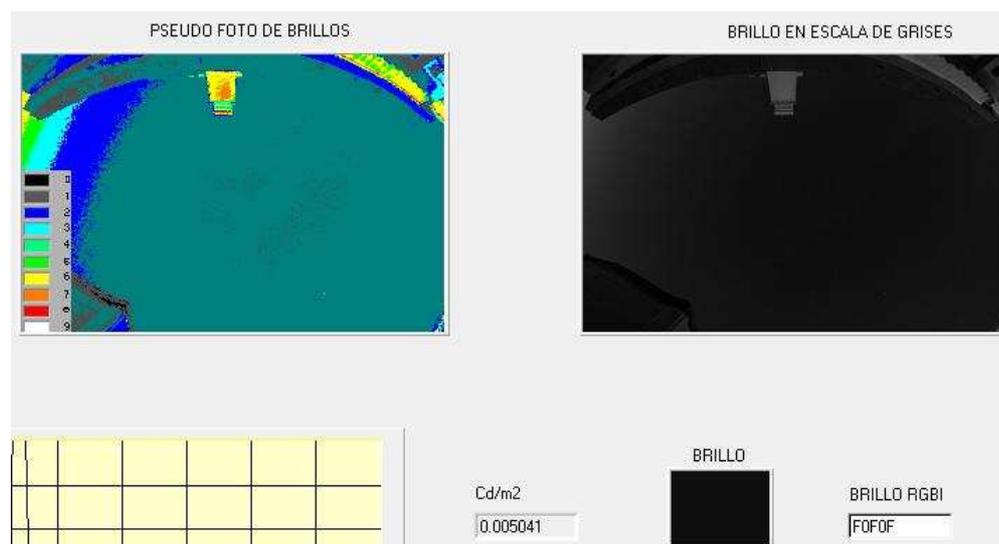


Figura 107 Medición del cénit del cielo para validar con SQM

El error obtenido es del orden del 5% lo que se puede considerar muy aceptable en tanto que el propio SQM especifica una precisión de  $\pm 10\%$ . En todo caso, la propia tolerancia del SQM indica que este parámetro no requiere de una elevada precisión ya que se utiliza para una evaluación del orden o nivel de contaminación lumínica del cielo con fines astronómicos.

### 5.7.12.2.- Comparativa con mediciones con LS-110 alumbrado calle

Una de las primeras pruebas realizadas en campo fue una fotografía urbana sobre un vehículo bajo farola que reunía varias circunstancias. Por una parte se tenía el alumbrado directo de la farola sobre la acera y sobre el asfalto. Por otra parte, un vehículo de gran tamaño tipo furgoneta aparcado presentaba varias superficies blancas en la escena que permitieron realizar diversas pruebas. (Figura 108)

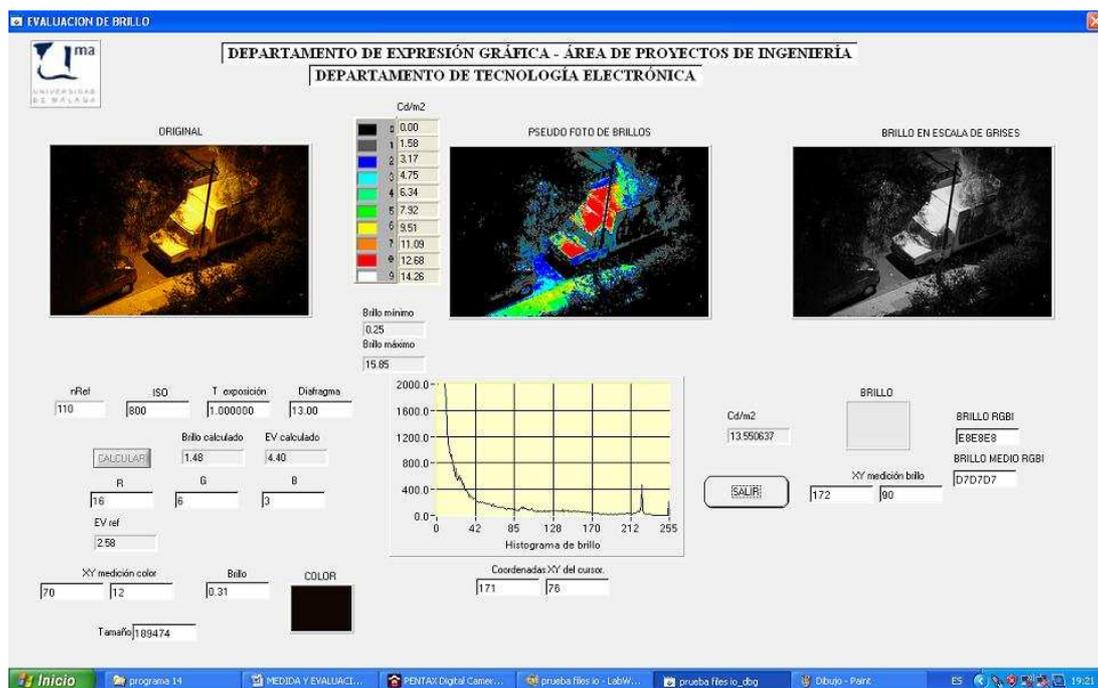


Figura 108 Farola sobre calzada y vehículo aparcado

Esta escena resultaba peculiar en tanto que se puede observar en el histograma, y en el propio contraste de la misma, cómo las zonas que en un momento dado podrían resultar de interés se encuentran en los extremos. Así, el vehículo, blanco y bajo la farola, se sitúa en valores muy próximos al 255, en la zona alta, con lo que entraría en la zona descartada de

nuestra propuesta. Del mismo modo, la mayoría de la escena está en la zona oscura, cercana al cero, con lo que también quedaría descartada.

De hecho, sólo las zonas centrales, en principio para las que se fijaron las condiciones de disparo, dieron resultados aceptables en las mediciones comparativas. Estas zonas son las situadas en los tonos azules-verdes de la pseudofotografía de colores y básicamente se correspondieron con las mediciones sobre el asfalto y sobre la acera (que tenía una zona clara y otra rojiza).

### 5.7.12.3.- Comparativa con mediciones con LS-110 (parque)

Así mismo se realizaron mediciones en un parque con alumbrado nocturno obteniéndose resultados satisfactorios tales como medidas con el LS110 del orden de 2,5 cd/m<sup>2</sup> en zonas concretas y 2,533214 en el programa CVI. (Figura 109)

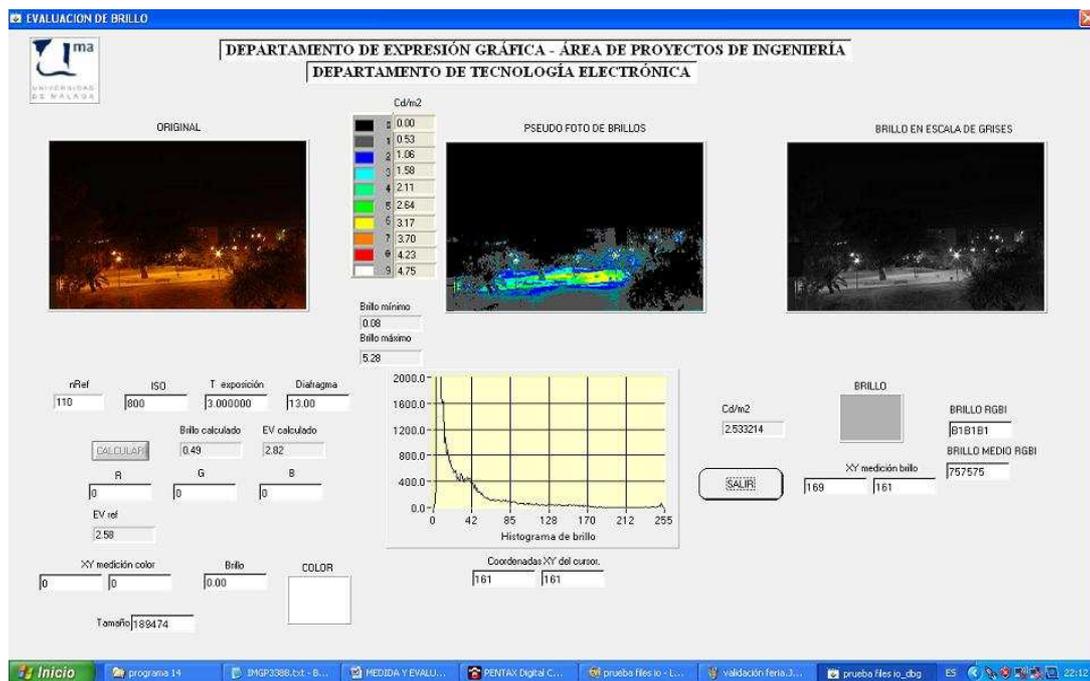
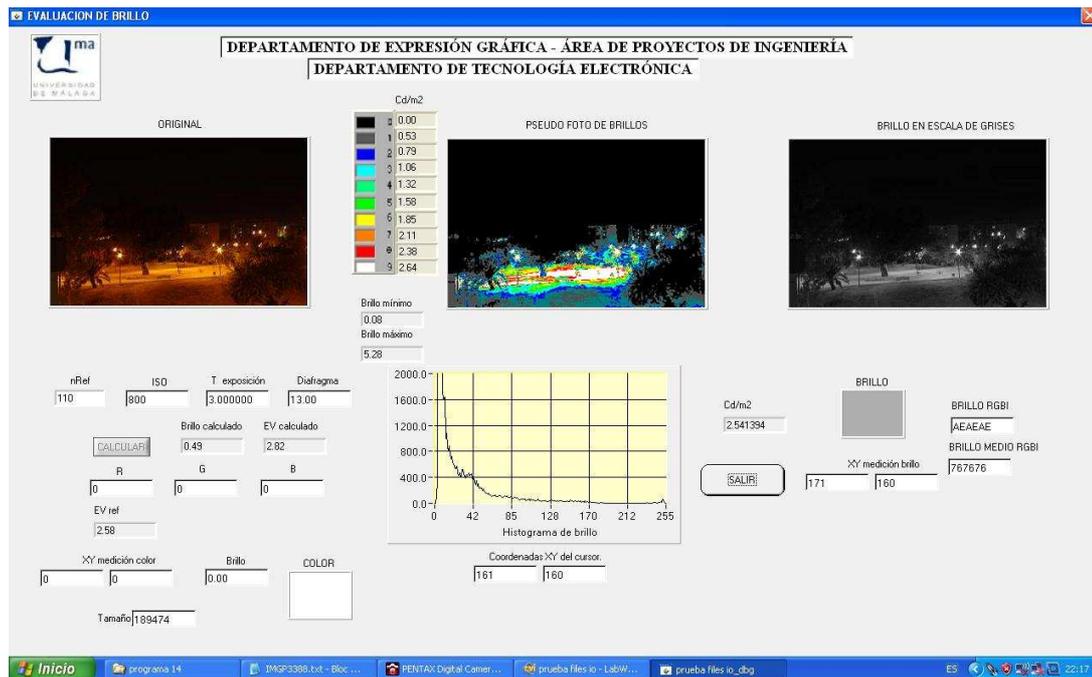


Figura 109 Mediciones en parque público

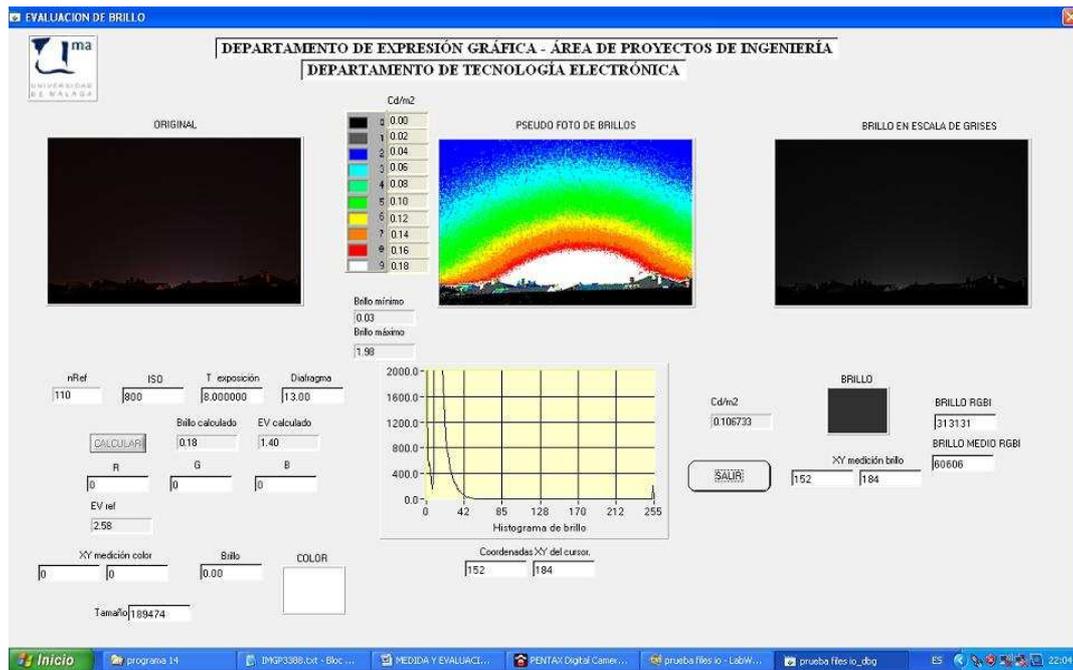


**Figura 110** Figura Mediciones en parque público - Variando pseudofotografía

Como se observa en las figuras anteriores no sólo se realizaron mediciones sino que modificando constantes del programa se puede variar los niveles de la pseudofotografía de colores (fotografía central) pudiéndose así determinar y especificar zonas de máximos con facilidad. (Figura 110)

#### 5.7.12.4.- Comparativa caso eventos (Feria Málaga 2015)

Los eventos y actividades puntuales no suelen contemplarse bajo el concepto de la contaminación lumínica en tanto que se supone que su duración, no permanente en el tiempo, no llega a alterar el medio. Sin embargo nos resultó de interés poder realizar mediciones sobre el halo luminoso producido sobre la ciudad con motivo de la celebración de la Feria de Málaga, entre otras razones porque nos permitía disponer de un rango de contrastes mayor al habitual. (Figura 111)



**Figura 111 Halo producido por evento, feria de Málaga**

Tanto por la oscuridad media como por la propia escena en sí no se disponían de puntos exactos de referencia, salvo en las techumbres de las casas que tapaban el horizonte. En este sentido se tomó la medida sobre un triángulo que se formaba en estas y resultaba fácilmente identificable en el centro de la escena ( $0,1 \text{ cd/m}^2$ ). A partir de ahí se tomaron una medidas “orientativas” a una elevación de unos 30-40 grados ( $0,05 \text{ cd/m}^2$ ) y otra por encima sobre los 40-50 grados ( $0,03 \text{ cd/m}^2$ ).

Con una fotografía a la que aplicó un desplazamiento de 1 EV se obtuvieron resultados aceptables en el orden de errores inferiores al 5%.

### 5.7.12.5.- *Medición de anuncios publicitarios (otras fuentes urbanas)*

La normativa que contempla la contaminación lumínica no sólo se refiere a las instalaciones de alumbrado vial. Entre otros, una de las fuentes contaminantes que en ocasiones puede incluso superar al alumbrado, son los anuncios publicitarios. En este sentido el RD 1890 de 2008 menciona que, en el ámbito de aplicación del Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior, “A los efectos de este reglamento, se consideran los siguientes tipos de alumbrado:

- a) *Vial (Funcional y ambiental);*
- b) *Específico.*
- c) *Ornamental;*
- d) *Vigilancia y seguridad nocturna*
- e) *Señales y anuncios luminosos*
- f) *Festivo y navideño”*

Según un artículo de la CNN titulado “Hong Kong tiene la peor contaminación lumínica del mundo” (CNN\_Noticias), el lugar con más contaminación lumínica en Hong Kong es el Museo Espacial en Tsim Sha Tsui, una zona 1,000 veces más brillante que lo permitido por la norma internacional debido a **la gran cantidad de vallas publicitarias** y focos en los alrededores.

Con este motivo se realizó un estudio más extenso en este contexto y se propuso una publicación al respecto como más adelante se detalla. Durante la realización de esta publicación se realizaron mediciones y comprobaciones de diversas vallas publicitarias con las que también se obtuvieron resultados aceptables, habida cuenta de que, como hemos propuesto, nuestra intención no es tanto la medición de cualquier valor en la escena sino la determinación de que ninguno supera los máximos establecidos.

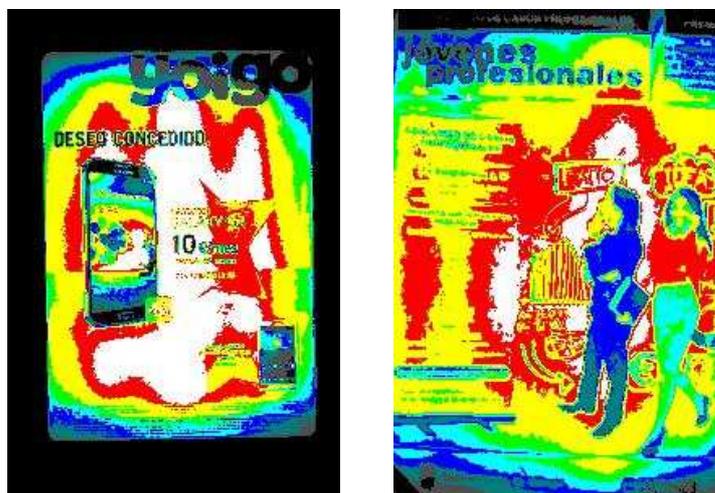


Figura 112 Pseudofotografías de colores de vallas publicitarias.

## 5.8.- Mediciones con SQM.

Disponiendo de un SQM (Sky Quality Meter) y tras haber visto diversos trabajos y publicaciones sobre el mismo, en la línea del estudio realizado sobre la medida y evaluación de la contaminación lumínica en entornos urbanos, además de la propuesta de la utilización de cámaras fotográficas, se han realizado mediciones con el mismo que nos han permitido alcanzar algunas conclusiones relativas al propio concepto de contaminación lumínica y a la utilización de un instrumento o parámetro para su evaluación.

Así mismo el SQM se ha utilizado para su comparación con nuestra herramienta en otros apartados de este trabajo, como se ha visto anteriormente.

La utilización de un instrumento ya validado y aceptado por otros estudios (Cinzano) nos permite desligar esta parte del trabajo de la herramienta propuesta, aunque se han realizado comparaciones entre nuestra herramienta y el SQM.

Esta parte del trabajo ha consistido básicamente en realizar un seguimiento con mediciones registradas en PC, en la línea que se han hecho en otros trabajos (Outer, Lolkema, Haaima, Hoff, Spoelstra, & Schmidt, 2011), en un mismo punto urbano y para una misma ciudad (en concreto Málaga) para concluir que los resultados obtenidos difieren considerablemente a pesar de que las variaciones de la fuente no se presupongan que lo hayan hecho en el mismo orden. Si una misma fuente origen de contaminación lumínica, utilizando un mismo instrumento de medida y en el mismo punto da resultados muy variables en diferentes momentos o períodos, no será fácil, incluso posible, establecer un valor de referencia o evaluación de la contaminación que produce esa fuente realizando una medida concreta sin considerar otros aspectos e intervenciones.

El SQM conectado por USB a un PC nos permite realizar un registro con una periodicidad programable de manera que la captación de datos se almacena en un fichero txt que posteriormente se puede procesar en una hoja Excel.

Para la realización de estas mediciones se ha utilizado el programa “SQM Reader” que permite registrar las lecturas en un fichero de texto que posteriormente se puede procesar con

una hoja Excel. En la Figura 113 y en la Figura 114 se muestran la pantalla principal del mismo y un ejemplo de resultado en fichero de texto.



Figura 113 SQM Reader - Pantalla

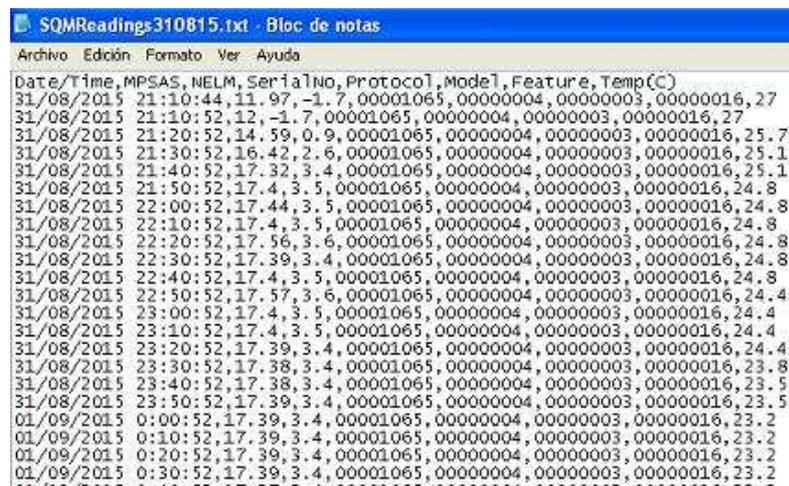


Figura 114 SQM Reader- Fichero de texto registro

Para nuestras mediciones se han elegido algunas circunstancias específicas que sirvan de ejemplo, sin que ello implique que sean las únicas a considerar, siendo nuestro objetivo sólo evidenciar la problemática planteada. En este sentido se han realizado registros con diversas condiciones como fase lunar, nubosidad, eventos (Feria de Málaga), ... constatándose resultados muy diferentes y validando nuestra teoría de que la contaminación lumínica no se puede evaluar con un único parámetro o instrumento de luminancia y/o iluminancia.

Uno de los registros que ilustra, aunque con razones extremas y evidentes, la idea de que la fuente (alumbrado en la ciudad) no es la única que interviene en la contaminación lumínica es el registro que se hizo en la noche del 29 al 30 de agosto de 2015. (Figura 115) en el mismo se comienza a registrar a las 21h y se observa cómo, como cabe esperar, los niveles de oscuridad aumentan conforme se aleja la hora de la puesta de sol y entra la noche alcanzando niveles de  $17 \text{ mag/arcsec}^2$  y dirigiéndose hacia los niveles de  $18 \text{ mag/arcsec}^2$  que pueden considerarse normales en ciudad. Entre las 22h y las 23h, y conforme avanza la noche, se observa cómo el brillo comienza a aumentar y, contrariamente a lo esperable, comienza a descender el nivel de oscuridad llegando incluso a órdenes de  $14 \text{ mag/arcsec}^2$  sobre las 2h30. Por otra parte, a partir de las 0h se observan picos con cambios que van entre 16 y  $14 \text{ mag/arcsec}^2$ , lo que es mucho. Esta situación, que se produce por razones conocidas y ajenas a la contaminación lumínica producida por la ciudad, responde a que entre las 10h y las 0h se va cubriendo el cielo de nubes bajas de poca densidad, casi bruma, pero que sirven de reflector de la luz de la ciudad a la vez que de difusor de la luz de la luna. En la segunda parte, entre las 0h y las 2h30, se produce otro efecto y se observan picos muy abruptos (los registros son cada 10 minutos) y que responden a cambios en las densidades nubosas, claros y oscuros en los que se producen apariciones y ocultaciones de la luna que además ya había alcanzado posiciones sobre el cénit del cielo.

Aunque esta situación es normal y no responde a unas variaciones a considerar en la medición de la contaminación lumínica, en todo caso a la adecuada elección del momento para proceder a la misma, sirve de ilustración en lo que se quiere evidenciar de que una misma fuente puede dar resultados muy diferentes en función de condiciones de contorno que escapan a la metodología actualmente utilizada. No nos referimos a situaciones meteorológicas como el ejemplo mostrado, y que sí se consideran actualmente, sino a otros factores como humedad del aire, partículas en suspensión, ... y que proponemos como líneas de trabajo futuras.

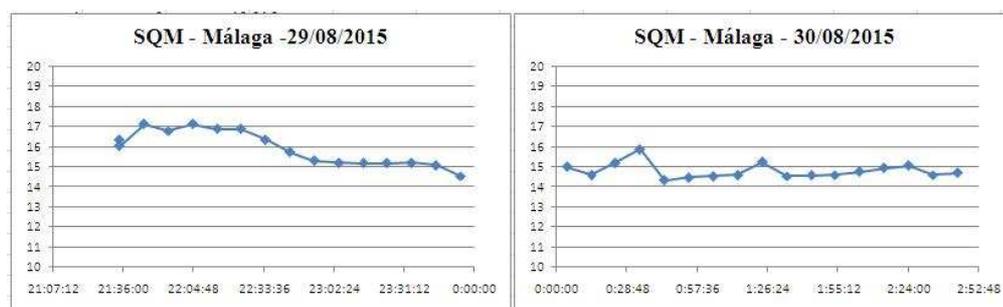
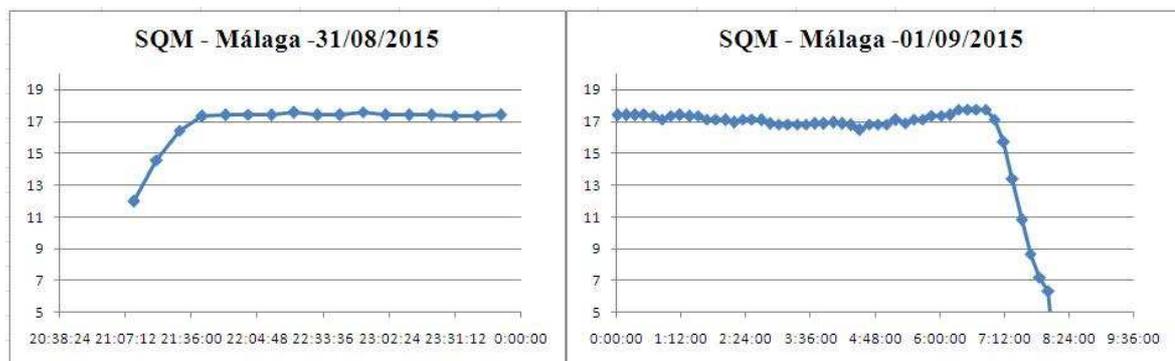


Figura 115 Registro SQM noche del 29/08/15 al 30/08/15

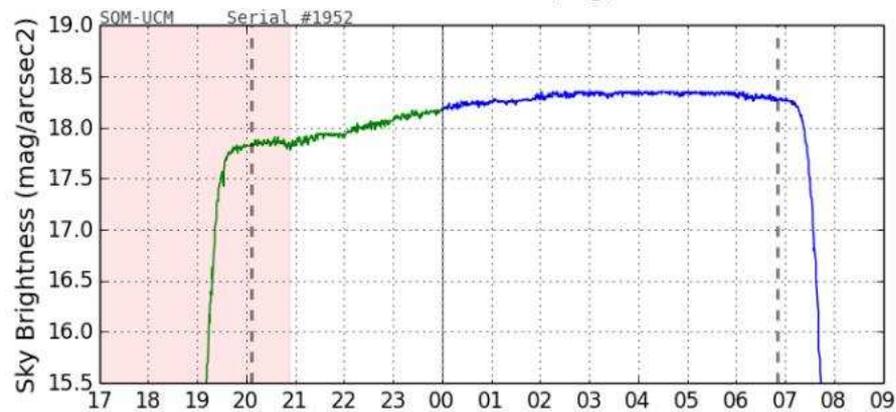
Con objeto de validar que la medición anterior resultaba atípica por las diversas consideraciones colaterales, se puede observar en la Figura 116 otro seguimiento nocturno en donde no se producían esas circunstancias climatológicas.

En este segundo registro se observa ya una situación de normalidad entre la puesta del sol y la salida con valores estables a lo largo de la noche por encima de  $17 \text{ mag/arcsec}^2$ . El leve descenso que se produce en torno a las 3h y las 4h y la posterior pendiente ascendente se produce con seguridad por el tránsito de la luna sobre el cénit del cielo que, aunque no estaba ya llena, aún tenía un porcentaje elevado de luminosidad. En todo caso, el tránsito de la luna, sin nubes o condiciones que sirvieran de reflectores no produce un efecto tan apreciable como en el registro de la noche del 29 de septiembre anterior.



**Figura 116 Registro SQM noche del 31/08/15 al 01/09/15**

El proyecto SEA-ProAm (UCM) de la Red Española de Estudios sobre la Contaminación Lumínica (REECL) persigue la monitorización del brillo de cielo nocturno mediante la creación de una red nacional de estaciones de registro del mismo. Para ello se requiere un SQM y un equipo informático para el registro de datos durante la noche. Los resultados son procesados mediante un programa específicamente diseñado para este fin, (Nievas & Zamorano, 2014). La Figura 117 muestra un ejemplo de resultado de este programa.



**Figura 117** Ejemplo seguimiento brillo cielo nocturno con SQM (Fuente REECL)

Desde la web de este proyecto (<https://guaix.fis.ucm.es/splpr/SQM-REECL>) se puede obtener información sobre el mismo así como acceder a la descarga del software de libre distribución PySQM.

La intervención de las condiciones climáticas y ambientales sobre la contaminación lumínica es lo suficientemente influyente como para requerir que una medición física de ésta deba realizarse con la notación de estas condiciones. Algunos trabajos consultados realzan la importancia de esta circunstancia relevando incluso que la nubosidad actúa como efecto multiplicador de los efectos de la contaminación lumínica. (Kyba, Ruhtz, & Hölker F.)

La principal consecuencia que se obtiene en este apartado es que la medición de la calidad del cielo en un determinado entorno no se puede utilizar como una característica de contaminación lumínica en dicho entorno sin considerar agentes presentes en el momento de la medida y que pueden variar en otros momentos. Consecuentemente no se puede utilizar esta medida para caracterizar la contaminación emitida por un determinado entorno (una ciudad, una instalación,...) sino para caracterizar una situación concreta correspondiente a un momento dado.

## 5.9.- Señales y anuncios luminosos.

Como se ha reseñado anteriormente, la contaminación lumínica en entornos urbanos no sólo proviene del alumbrado público sino que, y en particular en grandes urbes sobre pobladas, gran parte de ella proviene también de vallas y anuncios publicitarios. Grandes capitales como Nueva York, Shanghái o Hong Kong encabezan las listas de ciudades más contaminantes lumínicamente debido en parte a estos últimos. (Sanz)

Por otra parte, dentro de los trabajos y estudios realizados en esta tesis se observó que las normativas relativas a las instalaciones de alumbrado, en particular las Instrucciones Técnicas Complementarias que refieren, determinan metodologías e instrumentación para la evaluación de estas instalaciones de alumbrado que incluyen detalles muy concisos sobre las mediciones, distancias, instrumentos y metodología a utilizar. Sin embargo, en el apartado relativo a otras fuentes de alumbrado, en concreto en lo relativo a señales y anuncios luminosos, estas ITCs prácticamente se limitan a indicar unos valores máximos permitidos de luminancia sin una especificación concreta de la metodología a utilizar. (Figura 118) (Figura 119)

MINISTERIO DE INDUSTRIA TURISMO Y COMERCIO	MEDICIONES LUMINOTÉCNICAS EN LAS INSTALACIONES DE ALUMBRADO	ITC – EA – 02
--	---	---------------

Tabla 13 – Niveles de luminancia máxima de señales y anuncios luminosos.

Superficie (m <sup>2</sup> )	Luminancia Máxima (cd/m <sup>2</sup> )
$S \leq 0,5$	1.000
$0,5 < S \leq 2$	800
$2 < S \leq 10$	600
$S > 10$	400

En todo caso, se deberán cumplir los valores máximos de luminancia de rótulos y anuncios luminosos, establecidos para cada Zona E1, E2, E3 y E4 en la tabla 3 de la Instrucción Técnica Complementaria ITC-EA-03.

**Figura 118 Extracto ITC-EA-02**

MINISTERIO DE INDUSTRIA TURISMO Y COMERCIO		RESPLANDOR LUMINOSO NOCTURNO Y LUZ INTRUSA O MOLESTA			ITC – EA – 03
<b>Tabla 3.- Limitaciones de la luz molesta procedente de instalaciones de alumbrado exterior</b>					
Parámetros luminotécnicos	Valores máximos				
	Observatorios astronómicos y parques naturales E1	Zonas periurbanas y áreas rurales E2	Zonas urbanas residenciales E3	Centros urbanos y áreas comerciales E4	
Illuminancia vertical ( $E_v$ )	2 lux	5 lux	10 lux	25 lux	
Intensidad luminosa emitida por las luminarias ( $I$ )	2.500 cd	7.500 cd	10.000 cd	25.000 cd	
Luminancia media de las fachadas ( $L_m$ )	5 cd/m <sup>2</sup>	5 cd/m <sup>2</sup>	10 cd/m <sup>2</sup>	25 cd/m <sup>2</sup>	
Luminancia máxima de las fachadas ( $L_{max}$ )	10 cd/m <sup>2</sup>	10 cd/m <sup>2</sup>	60 cd/m <sup>2</sup>	150 cd/m <sup>2</sup>	
Luminancia máxima de señales y anuncios luminosos ( $L_{max}$ )	50 cd/m <sup>2</sup>	400 cd/m <sup>2</sup>	800 cd/m <sup>2</sup>	1.000 cd/m <sup>2</sup>	

**Figura 119 Extracto ITC-EA-03**

La revisión de estas normativas nos lleva a que uno de los instrumentos reseñados es el luminancímetro. Este instrumento es caro, no habitual en el instrumental de los servicios técnicos (ayuntamientos, oficinas técnicas,...) y además presenta una serie de inconvenientes a la hora de tomar mediciones en campo. Entre estos inconvenientes se encuentra el hecho de que se realiza una medida puntual con lo que medir una escena implica tomar múltiples mediciones para barrer la misma. Esto conlleva problemas, en particular si la escena no es estable y, en general, de acumulación de errores por mediciones repetitivas sucesivas. Todo ello sin mencionar el tiempo a invertir y la intervención de errores humanos.

En varias ocasiones, y en particular en lo relativo a señales y anuncios luminosos, la normativa establece máximos a no superar. A la hora de evaluar estos máximos, o bien el operario decide subjetivamente la ubicación de los mismos, o bien realiza multitud de medidas barriendo toda la escena para luego determinar la presencia de máximos.

La utilización de una fotografía digital y su procesado mediante un programa resuelve esta problemática. Por una parte la toma de todos los puntos de la escena se realiza en un

---

mismo instante. Por otra parte la determinación de los máximos no se realiza subjetivamente por el operario sino que un simple proceso por programa localiza dichos máximos. Así mismo, este proceso añade otras ventajas como la realización de una pseudofotografía de colores por niveles que permite una evaluación en conjunto de la escena, valoración de niveles medios, registro automático de la información (eliminación de errores de traslación escrita), documentación, ...

A todo ello se añade la ventaja de que una cámara fotográfica DSLR es un aparato que sí suele estar disponible en servicios técnicos y, en todo caso, su coste no es elevado, en tanto que un luminancímetro, amén de su elevado coste, no suele estar disponible habitualmente en estos entornos.

Por todo ello surgió la iniciativa de proponer una publicación en la revista Dyna, publicación que es el “Órgano Oficial de Ciencia y Tecnología de la Federación de Asociaciones de Ingenieros Industriales de España (FAIIE)”, estrechamente relacionada por tanto con el ámbito de los proyectos de ingeniería y que además figura en el informe JCR de Thomson-Reuters lo que le confiere una garantía sobre el prestigio y la calidad de sus publicaciones.

Dicha propuesta de artículo fue aprobada y publicada en el número 2 del año 90, Marzo-Abril de 2015, páginas 174-179, como artículo de investigación tras pasar el proceso de revisiones por pares de seis revisores. (Navas Borrero, de Andrés Díaz, & Heredia Larrubia, 2015)



---

# Capítulo 6.- Conclusiones y líneas de futuro.

---

## 6.1.- Introducción.

La realización de este trabajo ha permitido cubrir los objetivos establecidos en su comienzo así como profundizar en los conocimientos del tema como base para continuar una línea de investigación en el contexto entablando líneas de futuro como se expone más adelante.

En la primera parte del trabajo se ha podido estudiar y analizar tanto el concepto y repercusiones de la contaminación lumínica como sus antecedentes, relativamente recientes, normativas, organizaciones y entidades relacionadas.

Una vez introducidos en el contexto se ha procedido al estudio del estado del arte de la instrumentación utilizada en los diversos entornos afectados por la contaminación lumínica así como de los diversos métodos utilizados para su evaluación.

Tras estos estudios previos, introductorios y preparatorios, se centraron los trabajos en el marco de la contaminación lumínica en entornos urbanos como uno de los contextos afectados y generadores de la misma.

Entre estos estudios y objetivos se han cubierto los siguientes resultados:

- Estudio del contexto urbano como afectado por la contaminación lumínica y también como uno de los principales orígenes de la misma, en particular por el alumbrado nocturno.
- Estudio de la normativa urbana relacionada. Particularmente se ha observado que ésta, de reciente implantación, va muy estrechamente relacionada con el rendimiento energético. En particular se han planteado consideraciones en lo relativo a la instrumentación señalada por las normativas actuales, en tanto que

ciñen su ámbito a la visión fotópica humana, con un punto de vista de rendimiento energético, y no contemplan adecuadamente otros contextos como el astronómico y/o el medioambiental. Otro de los puntos a revisar es la reciente aparición del LED como fuente de luz en tanto que su espectro no queda abarcado por la instrumentación basada en curvas fotópicas.

- Estos estudios y conclusiones anteriores han servido de base para profundizar en instrumentos alternativos y/o complementarios para la medición y evaluación de la contaminación lumínica en entornos urbanos. Si bien el luminancímetro es el instrumento clásico propuesto por la normativa, la utilización de cámaras fotográficas electrónicas ya se planteaba, en los inicios de esta tesis, como una línea de futuro a seguir tanto por organismos legislativos (Junta de Andalucía) como por numerosos trabajos que se han ido desarrollando antes y durante la realización de esta tesis. En el contexto urbano la normativa establece obligaciones de entidades autonómicas y municipales así como oficinas y estudios de proyectos que implican la utilización de una instrumentación costosa y no habitual hasta estos momentos. Entre ellos, el luminancímetro es un instrumento caro y no habitual en estos entornos. Por otra parte el luminancímetro tiene otros inconvenientes como el que realiza su medición puntualmente en un ángulo muy estrecho con lo que evaluar una escena implica la toma de múltiples medidas no simultáneas, tediosas y sujetas a errores de contorno y humanos. En nuestro trabajo se ha desarrollado la propuesta de cámaras fotográficas como alternativa. Si bien esta propuesta ya se ha estado, y se sigue, trabajando por otros investigadores, nuestro trabajo se añade como uno más de tantos. En particular nuestro trabajo centra su objetivo en la utilización de cámaras DSLR comerciales lo que aporta una disponibilidad mayor y menor coste para las entidades y oficinas mencionadas.
- En el marco del punto anterior, se han realizado propuestas nuevas, basadas en EV, de algoritmos para la calibración de la respuesta o función de conversión opto-electrónica habiéndose obtenido resultados con errores inferiores al 5% lo que se plantea como una alternativa adecuada para la evaluación de parámetros relacionados con la contaminación lumínica.

- 
- En paralelo a la propuesta de algoritmos se ha desarrollado un programa para la aplicación de estos a partir de los ficheros que contienen las fotografías.
  - Una vez obtenidos unos resultados aceptables se han realizado comprobaciones y comparaciones con instrumentos o métodos utilizados en otros contextos como el SQM y mediciones con objetivos ojo de pez para el estudio de la bóveda celeste, luminosidad del cielo y estudio de horizontes.
  - Complementariamente se ha propuesto un método abreviado simple de rápida evaluación de máximos en escenas basada en el histograma. Este método resulta de gran interés para una evaluación en campo simple y de bajo coste.
  - Se ha generado una publicación relacionada con una aplicación práctica real para la medición y evaluación de señales y anuncios luminosos.

## 6.2.- Conclusiones.

Tras el estudio de la evolución histórica de la contaminación lumínica, de las normativas que la contemplan, de los entornos afectados así como de los diferentes métodos de medición e instrumentación relacionada, una de las primeras conclusiones a las que se llega es que no se puede establecer un instrumento de medida único. Las razones que llevan a esta conclusión son diversas y se pueden esquematizar en las siguientes:

- No se puede hablar de un concepto único de contaminación lumínica. La contaminación lumínica presenta diferentes efectos y contextos en los que se presentan los mismos y que requieren diferentes tecnologías y parámetros a cuantificar.
- Las variables que intervienen en la contaminación lumínica, incluso bajo unas fuentes u orígenes estables, son muy diversas y cambiantes. Aspectos como la contaminación ambiental, humedad, partículas en suspensión, fases lunares, cambios sociales, eventos, y muchos otros ocasionan que una misma fuente de contaminación produzca mediciones puntuales diferentes y que impiden que la medición por sí sola permita cuantificar un nivel de referencia.
- Considerando el contenido de una de las definiciones de la contaminación lumínica como “efectos negativos que produce”, la naturaleza de estos efectos es muy diferente en distintos contextos con lo que su medición deberá ser relativa a éstos.
- Un FHS determinado, que es una de las medidas que se utiliza en la normativa como referencia, tendrá efectos muy diferentes dependiendo de otras condiciones ambientales. En la misma línea, emisiones horizontales, no consideradas de referencia por determinadas normativas, pueden tener, e incluso hay autores que las consideran más perjudiciales, efectos más graves que las verticales.

- Los espectros de las fuentes de luz tienen efectos diferentes y afectan de diferente manera a diferentes entornos con lo que la medida de la contaminación lumínica que provocan debe particularizarse.
- La propia orografía del terreno influye en los efectos de una contaminación lumínica que diera unos resultados iguales en mediciones y sin embargo sus efectos serían muy diferentes. Una misma instalación de alumbrado tendrá diferentes efectos en la contaminación lumínica que produce si se encuentra en un terreno llano, en un terreno en pendiente o en una vaguada.
- Los instrumentos especificados por las normativas, básicamente el luminancímetro, tienen una respuesta fotópica que no siempre responden a los efectos reales negativos que produce la fuente.
- La medición de la contaminación lumínica en entornos urbanos debe orientarse hacia la caracterización de instalaciones y los modelos predictivos.

En consecuencia, a la hora de evaluar la contaminación lumínica se deberá considerar no solamente una medida de un parámetro concreto, luminancia y/o iluminancia, sino que se deberá realizar un estudio previo de los efectos a considerar y de las condiciones de contorno implicadas.

Una alternativa o en todo caso complemento a la medición instrumental de unos parámetros se encontraría en un estudio o proyecto de la instalación desde el punto de vista teórico que permita obtener un modelo de comportamiento predictivo. Hoy en día toda instalación de alumbrado, y existen herramientas para ello, se puede simular y prever sus efectos desde diversos aspectos, niveles de iluminación, espectros, rendimientos, ...

La instrumentación de medida no queda por ello invalidada sino que debe servir para la validación de estas previsiones así como para los estudios e investigaciones de los efectos provocados. Estos estudios deberán estar particularizados al contexto o contextos involucrados.

En este sentido la utilización de cámaras fotográficas, una de las propuestas desarrolladas en esta tesis, se revela como una herramienta capaz de ofrecer soluciones válidas de alta relación prestaciones/coste.

### **6.3.- Líneas de futuro.**

Como ya se ha mencionado, este trabajo no se ha planteado como la búsqueda de un producto final concreto sino en la línea de introducirse en un campo de investigación relativamente reciente como es la contaminación lumínica, realizando algunas aportaciones en la medida de lo posible. Este campo apenas cuenta con dos o tres décadas de historia y los estudios, tanto de sus efectos como de la instrumentación y metodología de medición, están a la orden del día y se puede afirmar que existen aún muchas líneas de futuro que emprender.

La amplia extensión de este campo de investigación nos obliga a proponer dos grupos de líneas de futuro. Uno de ellos englobaría propuestas generales en el contexto de la evaluación y medición de la contaminación lumínica, posibles líneas de trabajo, campos de interés, ... En el segundo grupo se ciñen las líneas de futuro relativas a las propuestas concretas realizadas en esta tesis, en particular en lo relativo a los algoritmos y programas propuestos.

#### **6.3.1.- Líneas futuras generales.**

En el marco más concreto de esta tesis relativo a la propuesta de utilización de cámaras digitales para la medición de luminancia, una tarea pendiente estaría en asentar metodologías y homologaciones que permitieran a las administraciones públicas incorporar esta tecnología en las normativas.

Igualmente se ha planteado en este trabajo la idea de que no existe una medida única del concepto de contaminación lumínica. En este sentido la normativa que la regula se basa en la eficiencia energética relativa al aprovechamiento que se hace de la energía consumida respecto a la que se pierde o despilfarra. Del mismo modo se establecen zonificaciones, franjas horarias y valores de luminancia y luminosidad máximos y mínimos pero todo ello

con criterios basados en el espectro visible por el humano o visión fotópica. Los estudios sobre los efectos de la contaminación lumínica, así como la reciente aparición de nuevas tecnologías de alumbrado como la LED, revelan que los perjuicios que ocasiona ésta no siempre se presentan en este espectro. Consecuentemente, la medición de estos efectos, así como el concepto de contaminación lumínica relacionada, debería realizarse en los espectros que afectan a una determinada situación. Una posible línea de futuro podría enmarcar la catalogación de aspectos relacionados con la contaminación lumínica y el establecimiento de criterios de medición y evaluación adaptados a éstos.

Otro campo no del todo cerrado y que ofrece así mismo líneas de futuro interesantes radica en el estudio de la dependencia de la contaminación lumínica con otras contaminaciones y/o situaciones de contorno. Así, una misma contaminación procedente de una misma fuente puede tener, y de hecho tiene, efectos diferentes según las condiciones de otros parámetros. Parámetros como la humedad, climatología, partículas en suspensión, contaminación atmosférica y otros alteran los efectos directos de la contaminación lumínica. En este trabajo se ha constatado la existencia de informes locales y autonómicos sobre contaminación del aire con detección de niveles contaminantes a lo largo del año. Como propuesta de línea de trabajo futura en esta tesis se tiene la idea de buscar una relación entre estos niveles de contaminación del aire, en concreto de partículas en suspensión, con niveles de contaminación lumínica para una misma fuente o ciudad, por ejemplo. Así cabe suponer que una misma ciudad, en la que no se produzca un cambio drástico de sistemas de alumbrado, bajo unas condiciones similares de actividad (sin eventos como una feria) y horarios laborales (distinción entre jornadas laborales y no laborales), debería de mantener unos niveles de contaminación lumínica estables. Una propuesta de estudio estaría en determinar si estos niveles se alteran y determinar su causa con la hipótesis de que pudiera estar en niveles de contaminación del aire. Se podría entablar un sistema de registro anual de medición (tipo SQM o sistema fotográfico) del que se pudiera extraer gráficas a comparar con otras gráficas de esas otras contaminaciones. Esta tarea puede resultar ardua en tanto que pueden ser muchos los factores que afecten, no sólo las partículas en suspensión, tales como fase lunar, humedad, ... A modo de ejemplo, existen ya informes medioambientales de la Junta de Andalucía y del Ayuntamiento de Málaga que incluyen partículas en suspensión. Un estudio interesante sería poder establecer relaciones entre estos parámetros y un seguimiento

de las variaciones de la contaminación lumínica medida con otras condiciones similares (misma fase lunar, mismas condiciones atmosféricas y meteorológicas, ...).

Los registros de la propuesta anterior pueden servir también de base para otra propuesta que sería establecer unos registros de seguimiento a lo largo del tiempo de la evolución de los niveles de contaminación lumínica. En este sentido el estudio de estos registros podría servir de base para analizar causas/efectos. Así, por ejemplo, en estos momentos se está produciendo un cambio importante en la tecnología de alumbrado, en particular en la aparición de los LEDs. El seguimiento de la evolución de la contaminación lumínica y la posibilidad de establecer relaciones con actuaciones determinadas puede servir de base importante tanto para la adopción de medidas como para la regulación normativa.

En términos generales también se puede plantear una línea de futuros trabajos relacionada con la aparición de la tecnología LED, arriba mencionada. Ya se ven trabajos tanto sobre los efectos negativos que esta tecnología puede tener, en particular por el pico que presenta en la banda azul así como por su direccionalidad, como de planteamientos sobre efectos positivos, eficiencia, luz blanca, etc .... En nuestra opinión, la aparición y aceptación de esta tecnología en el mercado se ha producido de una manera un tanto precipitada dado que los efectos negativos que pudieran tener requerirían de estudios a largo plazo que no se han realizado o concluido aún.

Finalmente, la idea de que la medición de la contaminación lumínica no resulta simple y depende de diferentes factores y criterios, junto con los avances en la informática y la programación, nos permite pensar en una línea de trabajo consistente en el modelado de ciudades y de la contaminación lumínica que generan. La instrumentación física permitiría validar la propuesta de modelos. Ya se proponen trabajos para la caracterización y modelado predictivo en dicha línea, tanto en entornos astronómicos (Bessolaze) como urbanos (Solano Lamphar, Medición de la contaminación lumínica en espacios naturales. Propuesta de un modelo predictivo, 2010), (Meléndez Rúa, 2015)

### 6.3.2.- Líneas de futuro particulares:

Actualmente no se ha podido realizar el estudio de errores de repetibilidad en profundidad debido a la necesidad de un equipamiento no disponible que garantice que los cambios en sucesivas mediciones no se deban a cambios en las condiciones de escena y no a errores de la medida. Si bien se han realizado mediciones repetidas y extraído medias que absorban errores de repetibilidad, se requeriría una metodología basada en instrumentos no disponibles como fuentes de luz constante.

Aunque la respuesta fotópica se entiende que está compensada en la fórmula de conversión RGB así como en la matriz del sensor, no se han realizado estudios de la afección del color y sí se han observado otros trabajos que tampoco se enfrentan a esta opción y, en algunos casos, sólo expresan la posibilidad de que las diferencias de colores pudieran alterar resultados. Hasta ahora, salvo para el caso de filamentos, los alumbrados basados en lámparas de vapores de mercurio, de vapores de sodio ... tienen unos espectros muy concretos que limitan estos efectos. La aparición del led, con un espectro más amplio (blancos más puros) podría motivar un estudio al respecto que podría alterar algunos de los principios aceptados por ahora. El estudio con filtros fotópicos añadidos a la cámara de fotografía (no se han visto estudios al respecto, sí incorporados en el luminancímetro y otros instrumentos de medida) podría ser una propuesta de línea de futuro. Para este trabajo se ha adquirido un filtro fotópico de 50mm si bien no se ha establecido aún una línea de trabajo al respecto.

Dado que nuestra propuesta se basa en el uso de cámaras comerciales y éstas no están sujetas a restricciones para su utilización como instrumento de medida así como que cada fabricante tiene sus preferencias y algoritmos, queda pendiente un estudio o propuesta de metodología para la calibración de otros modelos y marcas. Aunque se han hecho algunas pruebas de validación con otras máquinas, éstas han sido tecnológicamente muy similares.

Otra línea de futuro relacionada con el apartado anterior estaría, dada la gran extensión que actualmente tienen estos aparatos, en el estudio y desarrollo de herramientas basadas en dispositivos móviles (teléfonos móviles, tablets, ...) Estos dispositivos, al igual que ya se ha dicho, han sufrido en los últimos años un avance considerable en tecnología y prestaciones que bien permiten presuponer la posibilidad de su utilización en la línea de este trabajo.



# Bibliografía y referencias.

## Bibliografía

A.L.A.N. (2013). *First International Conference on Artificial Light at Night*. Berlín.

Astrofísica\_UCM., U. C. (s.f.). *Contaminación Lumínica y Cielo Oscuro en la UCM*. Recuperado el 2015 de 10 de 15, de <http://pendientedemigracion.ucm.es/info/Astrof/users/jaz/CL/index.html>

Aubé, M. (2007). *Light Pollution modeling and detection in a heterogeneous environment*. Québec. Canada.: Universidad de Québec. Canada.

Bessolaze, N. *Vers un contrôle efficace de la pollution lumineuse :l'optimisation de l'éclairage public à partir d'une modélisation précise de la pollution lumineuse*. <http://www.astrosurf.com/>.

Bonmatí Carrión, M. Á. (2014). Efectos de la contaminación lumínica en la salud humana. *I Jornadas de Astroturismo - Andalucía*.

Castro Bonaño, J. M., Salvo Tierra, E., Márquez Moya, A. L., & Alcántara Valero, A. (2001). *Bases para un Sistema de Indicadores de Medio Ambiente Urbano en Andalucía*. Edición: Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.

CIE\_150. (2003). *Guide on the limitation of the effects of obtrusive light from outdoor lighting installations*. Commission Internationale de l'Eclairage.

CIE\_88. (2004). *Guide for the lighting of road tunnels and underpasses*.

Cinzano, P. (2004). A portable spectrophotometer for light pollution measurements. *Mem. S.A.It. Suppl. Vol. 5, 395*.

Cinzano, P. (2005). *Night Sky Photometry with Sky Quality Meter*. first draft, ISTIL Internal Report n. 9, v.1.4 2005.

Cinzano, P. (s.f.). *Roadpollution*. Recuperado el 2015 de 10 de 15, de Istituto di Scienza e Tecnologia dell'Inquinamento Luminoso : <http://www.lightpollution.it/roadpollution/>

Cinzano, P. (2003). Roadpollution: a software to evaluate and understand light pollution from road lighting installations. *CIE TC4-21*. Turín.

Cinzano, P. (2001). The first World Atlas of the artificial night sky brightness. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (MNRAS)*.

CNN\_Noticias. (s.f.). *Hong Kong tiene la peor contaminación lumínica del mundo*. Recuperado el 2015 de 10 de 15, de CNN noticias (Edición en español): <http://cnnespanol.cnn.com/2013/03/22/la-contaminacion-luminica-de-hong-kong-es-la-peor-del-mundo/#0>

Comisión\_de\_las\_comunidades\_europeas. (2009). *REGLAMENTO (CE) No 245/2009 DE LA COMISIÓN de 18 de marzo de 2009*.

- Comisión\_Europea. (2009). *REGLAMENTO (CE) No 245/2009*.
- Conrad, J. (2003). *Exposure Metering Relating Subject Lighting to Film Exposure*.
- Constantinos A., B., & Frangiskos V., T. (2008). A proposed system for real time luminancemeasurements of road an tunnel lighting installations. *Balkan Light 08*. Ljubljana.
- Consultoría lumínica*. (s.f.). Recuperado el 15 de octubre de 2015, de <http://www.consultoria-luminica.com/htm/mapas-de-polucion-luminica.htm>
- DECRETO\_FORAL\_Navarra\_199/2007. (2005). *DECRETO FORAL 199/2007, de 17 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento de desarrollo de la Ley Foral 10/2005, de 9 de*. Comunidad Foral de Navarra.
- Dietmar, W., & Helke, G. (2007). The Usage of Digital Cameras as Luminance Meters. *SPIE-IS&T/ Vol. 6502 65020U-1*.
- Doll, C. N. (2008). *Guide to Night-time Light Remote Sensing and its Applications*. Center for International Earth Science Information Network (CIESIN) Columbia University.
- Driscoll, W. G. (1978). *Handbook of Optics*. McGraw-Hill Publishing Company.
- Duriscoe, D. M., Luginbuhl, C. B., & Moore, C. A. (2007). Measuring Night-Sky Brightness with a Wide-Field CCD Camera. *PASP*, 192–213.
- Duriscoe, D. M., Luginbuhl, C., & Elvidge, C. (2013). The relation of outdoor lighting characteristics to sky glow from distant cities. *Lighting Res. Technol.*, 1-15.
- Everfine*. (2015). Recuperado el 30 de 10 de 2015, de <http://www.everfine.net/productinfo.php?pid=14&clid=9>
- Falchi, F., & Cinzano, P. *CCD measurement of night sky brightness, an IDA project*.
- Fundación StarLight*. (2009). Recuperado el 30 de octubre de 2015, de <http://fundacionstarlight.org/el-universo-starlight/>
- Gabele, H. (2006). *The usage of digital cameras as luminance meters. (Diploma Thesis)*. Colonia (Alemania).
- Galadí Enriquez, D. (2008). Medidas de brillo artificial del cielo nocturno: instrumentación y metodología. *CONAMA 9 - Congreso Nacional de Medio Ambiente*, (págs. 12-22).
- Galadí Enríquez, D., & Ribas Canudas, I. (1998). *Manual práctico de astronomía con CCD*. Barcelona: Ediciones Omega, S.A.
- García Gil, M. (2011). *Guía técnica de adaptación de las instalaciones de alumbrado exterior al decreto 357/2010, de 3 de agosto*. Dirección General de Cambio Climático y Medio Ambiente Urbano - Junta de Andalucía.

Generalitat\_de\_Catalunya. (2015). *DECRETO 190/2015, de 25 de agosto, de desarrollo de la Ley 6/2001, de 31 de mayo, de ordenación ambiental del alumbrado para la protección del medio nocturno.*

Generalitat\_de\_Catalunya. (2005). *DECRETO 82/2005, de 3 de mayo, por el que se aprueba el Reglamento de desarrollo de la Ley 6/2001, de 31 de mayo, de ordenación ambiental del alumbrado.* Generalitat de Cataluña.

Hanon-Degroote, T. *Analyse de la pollution lumineuse avec des outils amateurs en Belgique.* [http://www.beastro.be/publication/LP/LPMD\\_v3.pdf](http://www.beastro.be/publication/LP/LPMD_v3.pdf): Association pour la Sauvegarde du Ciel et de l'Environnement Nocturne.

Hiscocks, P. D. (2011). *Measuring Luminance with a Digital Camera.*

Hiscocks, P. D. (2013). *Measuring Luminance with a Digital Camera: Case History.*

Hollan, J. (2004). Metabolism-influencing light: measurement by digital cameras. *Cancer and Rhythm.* Graz, Austria.

Hunt, R. (1998). *Measuring Colour.* Regent Publishing Services Ltd.

IDAE. (2008). *Protocolo de auditoría energética de las instalaciones de alumbrado público exterior.* Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

*Iniciativa Starlight.* (2007). Recuperado el 12 de 10 de 2015, de <http://www.starlight2007.net/pdf/DeclaracionStarlightES.pdf>

International\_Electrotechnical\_Commission. (1998). *IEC/4WD 61966-2-1: Colour Measurement and Management in Multimedia Systems and Equipment - Part 2-1: Default RGB Colour Space - sRGB.*

ISO. (2009). *ISO 14524:2009 Photography — Electronic still-picture cameras — Methods for measuring optoelectronic conversion functions (OECFs).*

iTec\_Astronomica\_S.L.\_ASTMON. (s.f.). *ASTMON - Monitores de contaminación lumínica.* Recuperado el 14 de Octubre de 2015, de <http://astro-itec.es/ASTMON>

iTec\_Astronomica\_S.L.\_EXCALIBUR. (s.f.). *EXCALIBUR - Monitores de extinción.* Recuperado el 14 de Octubre de 2015, de <http://astro-itec.es/EXCALIBUR>

JEITA CP-3451, T. (2002). *Exchangeable image file format for digital still cameras: Exif Version 2.2.* Japan Electronics and Information Technology Industries Association.

Junta\_de\_Andalucía. (2010). *DECRETO 357/2010, de 3 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento para la Protección de la Calidad del Cielo Nocturno frente a la contaminación lumínica y el establecimiento de medidas de ahorro y eficiencia energética.* Consejería de Medio Ambiente.

Junta\_de\_Andalucía. (2010). *Medio ambiente en Andalucía - Informe 2010.*

Kerr, D. A. (2008). *The ISO Definition of the Dynamic Range of a Digital Still Camera.*

- Kolláth, Z. (2009). *Using Digital SLR camera to monitor light pollution*. Budapest, Hungary: Konkoly Observatory.
- Kyba, C., Ruhtz, T., & Hölker F., F. (s.f.). Cloud coverage acts as an amplifier for ecological light pollution in urban ecosystems. *PLoS One*. 2011 Mar 2;6(3):e17307. doi: 10.1371/journal.pone.0017307.
- LEY\_3/2005\_Islas\_Baleares. (2005). *LEY 3/2005, de 20 de abril, de protección del medio nocturno de las Illes Balears*. COMUNIDAD AUTÓNOMA DE LAS ILLES BALEARS.
- LEY\_31/1988. (1988). *LEY 31/1988 de 31 de octubre, sobre Protección de la Calidad Astronómica de los Observatorios del Instituto de Astrofísica de Canarias*. Gobierno de España.
- Ley\_6/2001\_Generalidad\_de\_Cataluña. (2001). *Ley 6/2001, de 31 de mayo, de ordenación ambiental del alumbrado para la protección del medio nocturno*. Generalidad de Cataluña.
- LEY\_6/2006\_Cantabria. (2006). *LEY 6/2006, de 9 de junio, de prevención de la Contaminación Lumínica*. Comunidad Autónoma de Cantabria.
- Ley\_Foral\_Navarra\_10/2005. (2005). *Ley Foral 10/2005, de 9 de noviembre, de ordenación del alumbrado para la protección del medio nocturno*. Comunidad Foral de Navarra.
- Longcore, T., & Rich, C. (2004). Ecological light pollution. *Front Ecol Environ* , 191-198.
- Meléndez Rúa, L. P. (2015). *Caracterización de la intensidad luminosa responsable de la contaminación lumínica en entornos urbanos*. Barcelona: Tesis doctoral UPC.
- Ministerio\_de\_Industria\_Energía\_y\_Turismo. (2013). *Guía Técnica de aplicación: Eficiencia Energética en instalaciones de alumbrado exterior. Mediciones luminotécnicas en las instalaciones de alumbrado*. GUÍA-EA-07.
- Mizon, B. (2012). *Light Pollution – Responses and Remedies*. Springer.
- Morales Rubio, Á. Impacto de la contaminación lumínica sobre la naturaleza y la biodiversidad. *Jornadas de Iluminación*. Universidad de Valencia.
- Moreno Rivero, T. (1996). *El Color, Historia, teoría y aplicaciones*. Editorial Ariel, S.A.
- Morgan\_Taylor, M. (2013). *The Legal Regulation of Light Pollution*.
- Muñoz, V. F., Gómez de Gabriel, J., Fernández Lozano, J., Molina-Mesa, R., & Serón-Barba, J. *Desarrollo de un goniómetro para caracterización de luminarias*. Instituto de Automática y Robótica Avanzada de Andalucía. Universidad de Málaga.
- Narisada, K., & Schreuder, D. (2004). *Light Pollution Handbook*. Springer.
- Navarro\_Barranco, C., & Hughes, L. E. (2015). Effects of light pollution on the emergent fauna of shallow marine ecosystems: Amphipods as a case study. *Marine Pollution Bulletin* , 235-240.
- Navas Borrero, J. L., de Andrés Díaz, J. R., & Heredia Larrubia, J. R. (2015). Herramienta para la evaluación de la luminancia en señales y anuncios luminosos. *Dyna* , 169-172.

Nielsen, M., & Stokes, M. *The Creation of the sRGB ICC Profile*. Hewlett-Packard Company.

Nievas, M., & Zamorano, J. (2014). *PySQM the UCM open source software to read, plot and store data from SQM photometers. V1.2*. Departamento de Astrofísica y Ciencias de la Atmósfera - Grupo de Astrofísica Extragaláctica de Instrumentación Astronómica.

Outer, P. d., Lolkema, D., Haaima, M., Hoff, R. v., Spoelstra, H., & Schmidt, W. (2011). Intercomparisons of Nine Sky Brightness Detectors. *Sensors 2011, 11, 9603-9612*; doi:10.3390/s111009603 .

Pascale, D. (2003). *A comparison of four multimedia RGB spaces*.

Pérez, F. (4 de diciembre de 2006). La contaminación lumínica de Málaga limita el uso del telescopio de Sierra Nevada. *El País* .

*Punto-nodal-plano-focal-y-distancia*. (s.f.). Recuperado el 30 de 10 de 2015, de <http://christiancisternasfotografo.blogspot.com.es/2012/06/punto-nodal-plano-focal-y-distancia.html>

Rabaza Castillo, O. (2010). *Diseño de dispositivos de control y medición de contaminación lumínica en aplicaciones en la ingeniería civil y astronomía. (Tesis Doctoral)*.

Rabaza Castillo, O., Aznar Dols, F., Espín Estrella, A., & Peña García, A. (2012). Sistema y método para la medida y monitorización de la contaminación lumínica del cielo nocturno. *XXXIII Simposium Nacional de Alumbrado*. Toledo (España).

Ramírez González, L. A., Zamorano, J., & Gallego, J. (2001). *Medida de la luminosidad de fondo de cielo de la U.C.M.* Depto. de Astrofísica y CC. De la Atmósfera (Universidad Complutense de Madrid).

Ranea Palma, Á. (2009). *Nuevo reglamento de protección de la calidad del cielo nocturno frente a la contaminación lumínica*. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.

RD\_1890/2008. (2008). *REAL DECRETO 1890/2008, de 14 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado*. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

RD\_243/1992. (1992). *REAL DECRETO 243/1992, de 13 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento de la Ley 31/1988, de 31 de octubre, sobre protección de la calidad astronómica de los Observatorios del Instituto de Astrofísica de Canarias*. Gobierno de España.

RED.com. (s.f.). *UNDERSTANDING LENS VIGNETTING*. Recuperado el 14 de Octubre de 2015, de <http://www.red.com/learn/red-101/lens-vignetting>

Rich, C., & Longcore, T. (2006). *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*. Island Press.

Rodríguez\_Font, M. *La contaminación lumínica*. Derecho del Medio Ambiente y Administración Local / Fundación Democracia y Gobierno Local.

Sanz, D. (s.f.). *Ciudades con mayor contaminación visual*. Recuperado el 15 de 10 de 2015, de Ecología Verde: <http://www.ecologiaverde.com/ciudades-con-mayor-contaminacion-visual/>

---

Schwarz, H. E. (2002). *Light Pollution: The global view*. Kluwer Academic Publishers.

Sierra Garriga, C. (2002). *Aplicaciones luminotécnicas de cámaras digitales (Tesis Doctoral)*.

Sierra Garriga, C., Sanz Ciria, R., González Benítez, M., & García-Cascales, M. (2013). GPS based measured system for urban lighting. *17th International Congress on Project Management and Engineering*. Logroño.

Solano Lamphar, H. A. (2010). *Medición de la contaminación lumínica en espacios naturales. Propuesta de un modelo predictivo*. Barcelona: Tesis doctoral UPC.

Solano Lamphar, H. A., San Martín Páramo, R., & García Gil, M. (2009). Estudio Sobre Contaminación Lumínica en el Parque Natural del Delta del Ebro. *Ciencia & Trabajo, ISSN-e 0718-2449, año 11 número 34*, 211-216.

Spielman, D. R. (2001). *The ANSI PH3.49-1971 Specification And the Myth of the 18% Light Meter Calibration*.

Teikari, P. (2007). *LIGHT POLLUTION: Definition, legislation, measurement, modeling and environmental effects*. Universidad Politécnica de Cataluña.

*Understanding lens vignetting*. (2013). Recuperado el 30 de 10 de 2015, de <http://www.red.com/learn/red-101/lens-vignetting>

Upgren, A. (2006). *Sky&Telescope*. Recuperado el 2015, de Every think you ever wanted to know about light pollution: <http://www.skyandtelescope.com/astronomy-resources/everything-you-ever-wanted-to-know-about-light-pollution/>

Zheng, Y., Lin, S., Kambhamettu, C., Yu, J., & Kang, S. B. *Single-Image Vignetting Correction*. IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE.

---

## Anexo: Publicación

---

Uno de los resultados de esta tesis ha sido la consecución de una publicación referenciada en el JCR de Thomson-Reuters.

Como se ha mencionado anteriormente, parte del trabajo realizado en esta tesis se centró en el estudio de la aplicación de las cámaras fotográficas, propuesta en otra de las partes de la misma, para resolver algunos de los problemas relativos a la evaluación de señales y anuncios luminosos cuya metodología no queda especialmente definida en la normativa y que, además, presenta inconvenientes de apreciación subjetiva, determinación de máximos, medición simultánea...

A raíz de este estudio se pensó, como se detalla en el capítulo 5, en proponer una publicación del mismo en la Revista Dyna y, tras un proceso de revisión por pares de seis revisores, se aprobó la misma y se publicó en el número 2 del año 90, Marzo-Abril de 2015, páginas 174-179.

Como se ha indicado anteriormente, se eligió esta revista por, estando referenciada en el JCR, ser el “Órgano Oficial de Ciencia y Tecnología de la Federación de Asociaciones de Ingenieros Industriales de España (FAIIE)” y, en consecuencia, estar estrechamente relacionada con el ámbito de la ingeniería de proyectos, siendo el programa de doctorado al que pertenece esta tesis el de Ingeniería y Gestión de Proyectos.

En el siguiente párrafo se muestra el resumen de dicho artículo, estando disponible el artículo completo en [www.revistadyna.es](http://www.revistadyna.es) así como en la edición impresa de la revista.

### *RESUMEN:*

*El impacto sobre los costes de la energía eléctrica así como los efectos negativos que produce sobre entornos como la astronomía, la salud y el medio ambiente, han provocado que las administraciones públicas estén regulando las instalaciones de alumbrado considerando la contaminación lumínica como un objetivo relevante a contrarrestar.*

*La actual normativa que regula los aspectos relativos a la contaminación lumínica establece unos valores máximos de luminancia, en particular en lo referente a las señales y anuncios luminosos. La determinación de los puntos de la escena donde se producen estos valores máximos queda sujeta a la observación subjetiva del técnico que realiza la medida. La sensibilidad del ojo humano al brillo no es lineal y resulta engañosa en tanto que su objeto es la identificación de la escena y no la medida de valores e intensidades. Por otra parte, la utilización del luminancímetro convencional implica la medición punto a punto sobre la escena. Ello obliga a la toma de numerosas mediciones con objeto de barrer la totalidad de la escena y determinar los puntos donde se alcanzan los máximos. Esta acción no sólo resulta tediosa y sujeta a errores, sino que implica la toma de medidas en distintos instantes sucesivos lo que afecta a errores de repetitividad y de variación en el tiempo en escenarios no estables.*

*En este trabajo se propone la utilización de cámaras fotográficas digitales para la evaluación de la luminosidad, en particular para señales y anuncios luminosos. En este sentido, una fotografía digital dispone de información de color y brillo de todos los puntos que la componen. Originariamente la información suministrada por la fotografía está orientada a la reproducción de la imagen por lo que contemplan algunas correcciones y compensaciones para adaptarla a la visión humana.*

*Palabras Clave: contaminación lumínica, instrumentos de medida, fotometría, luminancia*



**HERRAMIENTA PARA LA EVALUACIÓN DE LA LUMINANCIA EN SEÑALES Y ANUNCIOS LUMINOSOS**

MARZO 2015  [Ver ejemplar](#) - Volumen: 90 - Páginas: 174-179

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7261>

AUTORES: JOSE LUIS NAVAS BORRERO - JOSÉ RAMÓN DE ANDRÉS DÍAZ - JUAN RAMÓN HEREDIA LARRUBIA

MATERIAS: TECNOLOGÍA DE LA INSTRUMENTACIÓN (INSTRUMENTOS ELECTRONICOS )

COMO REFERENCIAR ESTE ARTÍCULO: [Ver referencia](#)

**Figura 120** Publicación Revista DYNA

---

## Anexo: Ejemplos de Mediciones

---

En este anexo se muestran ejemplos de las hojas Excel utilizadas para realizar los cálculos y verificaciones durante el proceso de pruebas de los diferentes algoritmos que se fueron comprobando.

Este anexo se inserta a modo ilustrativo de diferentes muestras y en la realidad se realizaron muchos más, unos válidos y otros descartados por no obtenerse los resultados que se esperaban.

La confección de estas hojas Excel partía de la inserción de los datos de la fotografía obtenidos de la información EXIF de la misma y de los valores RGB de las zonas a contrastar con las mediciones realizadas con el luminancímetro, obtenidos con el programa Silkpix o, en otras ocasiones, con la propia herramienta CVI.

Los valores medidos se trasladaban a la hoja Excel a partir de la grabación audio que se realizaba durante las mediciones.

Los algoritmos a probar se reflejaban como funciones matemáticas en las casillas de resultados así como el cálculo de los errores obtenidos, su media y sus valores máximo y mínimo.

La utilización de estas hojas Excel ha sido fundamental en el desarrollo de este trabajo en tanto que han servido de herramienta para las distintas pruebas realizadas así como para la validación final del algoritmo propuesto. Por una parte han facilitado y acelerado las pruebas y por otra han permitido minimizar los errores que sin duda hubieran sido mayores en tareas manuales. Todas las pruebas e intentos se recalculaban rápidamente modificando aquellos parámetros y/o expresiones a probar obteniéndose los resultados, tanto numéricos como incluso gráficos, de forma inmediata y minimizándose la posibilidad de errores manuales.



APROXIMACIÓN FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA CÓDIGO RGB / LUMINANCIA

PLANTILLA: 8 Grises  
 LUZ: Natural (solar)  
 OBSERVACIONES: Secuencia de fotos una cada lectura, Plantilla de grises, Automática prioridad AV

Objetivo	m	Gamma	k	n Ref	EV	EV Ref	R	G	B	Banco	4094	255,875	
50mm	256	2,4	14	114	8	2,5650	1	0,7127	0,7152	0,0722	Negro	-48	3
						2,67	1	0,2990	0,5870	0,1140	Diferencia		252,875
						-2,5290	1	0,2127	0,7152	0,0722	(Puntos)		
										(dRGB)			

$$E_p = \log_2 \frac{A^3}{T} = \log_2 \frac{BS_x}{K}$$

Observ.	ISO	Dist.	T exp	EV log	Foto	L5-110	EV efec.	R	G	B	Rn	Gn	Bn	Rel.	Grel.	Brel.	Brillo Y	Brillo	EV efect.	Brax	Bmin	Bn	Error 1	B2n	Error B2n	L5110	Error 1 abs.
Multitag.	100	22	0,6	9,66	IMGP3343	220	9,63	162	159	154	0,63	0,62	0,60	0,36	0,34	0,32	159,28	88,00	55,46	591,62	9,24	216,27	-1,89	231,47	-5,21	220,00	1,69
Multitag.	100	22	0,6	9,66	IMGP3344	194	9,5	162	154	0,63	0,63	0,60	0,36	0,35	0,32	159,99	88,88	50,69	540,64	8,45	195,45	2,81	214,00	-10,31	194,00	2,81	
Multitag.	100	22	0,6	9,66	IMGP3345	152	9,5	145	143	136	0,57	0,56	0,53	0,28	0,27	0,24	142,42	69,38	50,69	540,64	8,45	158,92	4,55	162,16	-6,66	152,00	4,55
Multitag.	100	22	0,6	9,66	IMGP3346	102	9,63	107	106	105	0,42	0,41	0,41	0,15	0,14	0,14	106,14	36,55	55,46	591,62	9,24	98,22	-2,72	97,63	4,28	102,00	2,72
Multitag.	100	22	0,6	9,66	IMGP3347	76,8	9,5	95	96	95	0,37	0,38	0,37	0,11	0,12	0,11	95,72	29,40	50,69	540,64	8,45	75,82	-1,42	75,32	2,06	76,80	1,42
Multitag.	100	22	0,6	9,66	IMGP3348	48,8	9,5	88	71	72	0,27	0,28	0,28	0,06	0,06	0,06	70,43	15,69	50,69	540,64	8,45	47,31	-3,05	49,95	-2,36	48,80	3,05
Multitag.	100	22	0,6	9,66	IMGP3349	31	9,5	48	45	42	0,19	0,18	0,16	0,03	0,03	0,02	45,42	6,77	50,69	540,64	8,45	28,75	-7,26	33,27	-7,33	31,00	7,26
Multitag.	100	22	0,6	9,66	IMGP3350	18	9,5	32	28	26	0,13	0,11	0,10	0,01	0,01	0,01	38,71	3,07	50,69	540,64	8,45	21,07	17,05	25,36	-40,88	18,00	17,05



IMGP3343



Error medio	5,07 %
Error abs. máx.	17,05 %
Error abs. mín.	1,42 %



**APROXIMACIÓN FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA CÓDIGO RGB / LUMINANCIA**

**PLANTILLA:** Varias  
**LUZ:** LED  
**OBSERVACIONES:** Cartulinas lisas, negra, blanca, grises, blanco y negro...

Objetivo	n	Gamma	k	n Ref	EV	EV Ref	R	G	B	Blanco	4094	255,875	
50mm	256	2,4	14	114	6	2,5850	0,2127	0,7152	0,0722	Negro	48	3	
							2,67	0,2990	0,5870	0,1140	Diferencia	252,875	
							-2,5850	0,2127	0,7152	0,0722	(Pentax)		
											(sRGB)		

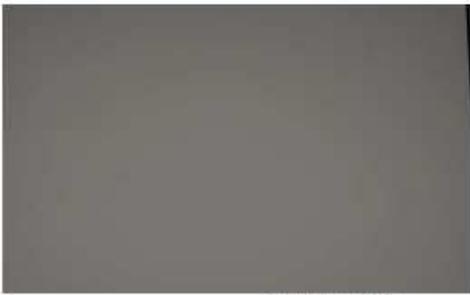
$$E_p = \log_2 \frac{A^p}{T} = \log_2 \frac{B \cdot S_p}{K}$$

Observ.	ISO	Diaf.	T exp	EV log	Foto	LS-110	EV efec.	R	G	B	Rn	Gn	Bn	RnL	GnL	BnL	Brillo Y	BrilloL	BEV efect	Bmax	Bmín	B n	Error 1	B2n	Error B2n	LS110	Error 1 abs.
negra	100	22	4	6,92	IMGP3351	15,7	7,00	108	109	106	0,42	0,43	0,41	0,15	0,15	0,14	108,57	38,35	8,47	90,35	1,41	15,78	0,50	15,51	1,21	15,70	0,50
blanca	100	22	0,3	10,66	IMGP3352	240	10,75	122	119	115	0,48	0,46	0,45	0,19	0,18	0,17	119,35	46,95	112,93	1204,62	18,82	250,22	4,26	246,37	-2,66	240,00	4,26
gris1	100	22	0,4	10,24	IMGP3353	168,2	10,38	113	113	110	0,44	0,44	0,43	0,16	0,16	0,15	112,78	41,59	84,70	903,47	14,12	169,02	0,49	166,08	1,26	168,20	0,49
gris2	100	22	0,4	10,24	IMGP3354	184	10,38	123	120	113	0,48	0,47	0,44	0,20	0,19	0,16	120,13	47,63	84,70	903,47	14,12	190,01	3,26	187,15	-1,71	184,00	3,26
B/Nb	100	22	1	8,92	IMGP3355	259	9,00	43	40	35	0,17	0,16	0,14	0,02	0,02	0,02	205,77	155,66	33,88	361,39	5,65	226,12	-12,70	300,94	-16,19	259,00	12,70
B/Nn	100	22	1	8,92	IMGP3355	18	9,00	43	40	35	0,17	0,16	0,14	0,02	0,02	0,02	40,28	5,45	33,88	361,39	5,65	17,39	-3,39	20,46	-13,65	18,00	3,39

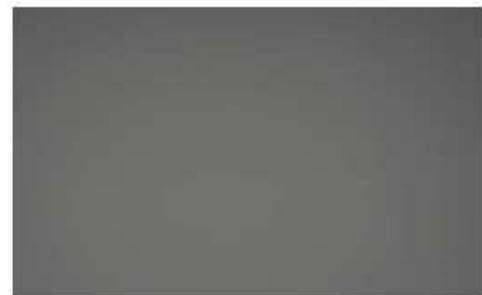
Error medio	3,07 %
Error abs. máx.	12,70 %
Error abs. mín.	0,49 %



3351 Cartulina negra



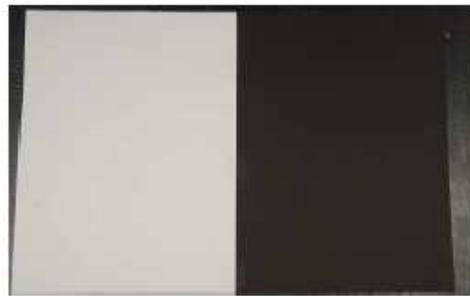
3352 Cartulina blanca



3353 Cartulina gris 1



3354 Cartulina gris 2



3355 Cartulina blanco y negro



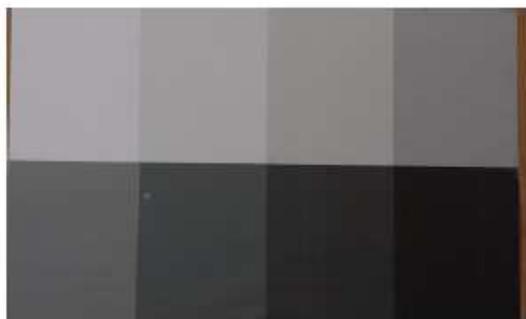
**APROXIMACIÓN FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA CÓDIGO RGB / LUMINANCIA**

**PLANTILLA:** 8 Grises  
**LUZ:** Natural (solar)  
**OBSERVACIONES:** Prioridad apertura

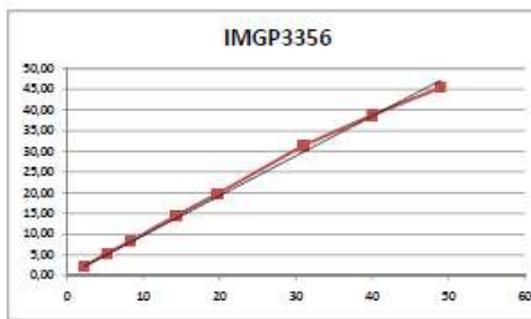
Objetivo	n	Gamma	k	n Ref	EV	EV Ref	R	G	B	Blanco	Negro	Diferencia
50mm	256	2,4	14	114	6	2,5850	1	0,2127	0,7152	0,0722	4094	255,875
						2,67	1	0,2990	0,5870	0,1140	48	3
						-2,5850	1	0,2127	0,7152	0,0722		252,875

$$E_v = k \log_2 \frac{A^2}{T} = k \log_2 \frac{BS_z}{K}$$

Observ.	ISO	Diap.	T exp	EV log	Foto	LS-110	EV efec.	R	G	B	Rn	Gn	Bn	RnL	GnL	BnL	Brillo Y	BrilloL	BEV efect	Bmax	Bmin	B n	Error 1	B2n	Error B2n	LS110	Error 1 abs.
Multiseg.	200	22	1,6	7,24	IMG3356	49	7,25	170	165	171	0,66	0,64	0,67	0,40	0,37	0,40	166,50	97,07	10,66	113,66	1,78	45,51	-7,13	50,00	-2,04	49,00	7,13
Multiseg.	200	22	1,6	7,24	Prio. Aper.	40	7,25	157	153	155	0,61	0,60	0,61	0,33	0,32	0,32	153,99	81,70	10,66	113,66	1,78	38,79	-3,02	40,81	-2,03	40,00	3,02
Multiseg.	200	22	1,6	7,24		31	7,25	144	137	137	0,56	0,54	0,54	0,28	0,25	0,25	138,49	64,79	10,66	113,66	1,78	31,40	1,30	31,72	-2,33	31,00	1,30
Multiseg.	200	22	1,6	7,24	Luz natural	19,7	7,25	112	107	108	0,44	0,42	0,42	0,16	0,15	0,15	108,14	38,04	10,66	113,66	1,78	19,71	0,06	19,37	1,65	19,70	0,06
Multiseg.	200	22	1,6	7,24	11h	14,35	7,25	90	90	92	0,35	0,35	0,36	0,10	0,10	0,11	90,14	25,95	10,66	113,66	1,78	14,43	0,54	14,46	-0,79	14,35	0,54
Multiseg.	200	22	1,6	7,24		8,3	7,25	60	61	63	0,23	0,24	0,25	0,04	0,05	0,05	60,93	11,79	10,66	113,66	1,78	8,24	-0,75	9,00	-8,42	8,30	0,75
Multiseg.	200	22	1,6	7,24		5,25	7,25	42	37	39	0,16	0,14	0,15	0,02	0,02	0,02	38,21	4,97	10,66	113,66	1,78	5,26	0,16	6,22	-18,49	5,25	0,16
Multiseg.	200	22	1,6	7,24		2,25	7,25	23	21	18	0,09	0,08	0,07	0,01	0,01	0,01	21,21	1,93	10,66	113,66	1,78	2,16	-4,19	4,72	-109,77	2,25	4,19



IMG3356



Error medio	2,14 %
Error abs. máx.	7,13 %
Error abs. mín.	0,06 %



**APROXIMACIÓN FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA CÓDIGO RGB / LUMINANCIA**

**PLANTILLA:** 8 Grises  
**LUZ:** Natural (solar)  
**OBSERVACIONES:** (Consecutiva a la 3356, la lectura de la cámara fue diferente)

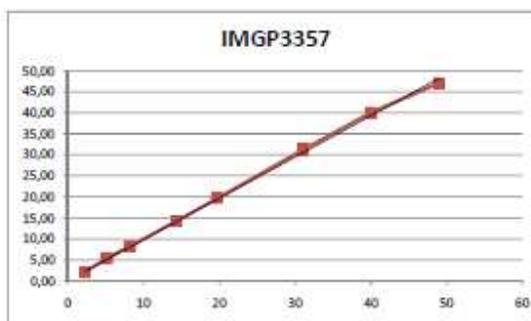
Objetivo	n	Gamma	k	n Ref	EV	EV Ref	R	G	B	Blanco	Negro	Diferencia
50mm	256	2,4	14	114	6	2,5850	1	0,2127	0,7152	0,0722	4094	255,875
						2,67	1	0,2990	0,5870	0,1140	48	3
						-2,5850	1	0,2127	0,7152	0,0722		252,875

$$E_s = \log_2 \frac{A^2}{T} = \log_2 \frac{BS_s}{K}$$

Observ.	ISO	Diaf.	T exp	PvLog	Foto	LS-110	EV efec.	R	G	B	Rn	Gn	Bn	RnL	GnL	BnL	Brillo Y	BrilloL	BEV efect	Bmax	Bmin	B n	Error	B2n	Error B2n	LS110	Error 1 abs.
Multiseg.	200	22	1,3	7,54	IMGP3357	49	7,50	159	154	160	0,62	0,60	0,63	0,34	0,32	0,35	155,50	83,48	12,67	135,16	2,11	47,06	-3,96	49,73	-1,49	49,00	3,96
Multiseg.	200	22	1,3	7,54	Prio. Aper.	40	7,50	148	142	144	0,58	0,55	0,56	0,29	0,27	0,28	143,42	69,92	12,67	135,16	2,11	40,01	0,03	40,87	-2,18	40,00	0,03
Multiseg.	200	22	1,3	7,54		31	7,50	131	125	124	0,51	0,49	0,48	0,23	0,20	0,20	126,20	52,97	12,67	135,16	2,11	31,20	-0,64	30,90	0,32	31,00	0,64
Multiseg.	200	22	1,3	7,54	Luz natural	19,7	7,50	100	97	97	0,39	0,38	0,38	0,13	0,12	0,12	97,64	30,66	12,67	135,16	2,11	19,60	-0,48	19,43	1,38	19,70	0,48
Multiseg.	200	22	1,3	7,54	11h	14,35	7,50	80	80	83	0,31	0,31	0,32	0,08	0,08	0,09	80,22	20,41	12,67	135,16	2,11	14,28	-0,51	14,64	-2,01	14,35	0,51
Multiseg.	200	22	1,3	7,54		8,3	7,50	51	53	53	0,20	0,21	0,21	0,03	0,04	0,04	52,57	8,88	12,67	135,16	2,11	8,28	-0,19	9,34	-12,56	8,30	0,19
Multiseg.	200	22	1,3	7,54		5,25	7,50	32	31	32	0,13	0,12	0,13	0,01	0,01	0,01	31,28	3,52	12,67	135,16	2,11	5,50	-4,82	6,61	-25,92	5,25	4,82
Multiseg.	200	22	1,3	7,54		2,25	7,50	16	15	14	0,06	0,06	0,05	0,01	0,00	0,00	15,14	1,23	12,67	135,16	2,11	2,20	-2,36	5,09	-126,04	2,25	2,36



IMGP3357



Error medio	1,62 %
Error abs. máx.	4,82 %
Error abs. mín.	0,03 %



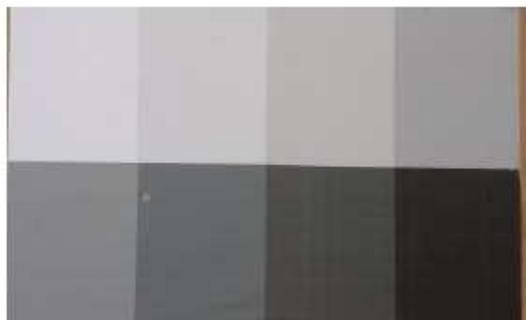
**APROXIMACIÓN FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA CÓDIGO RGB / LUMINANCIA**

**PLANTILLA:** 8 Grises  
**LUZ:** Natural (solar)  
**OBSERVACIONES:** (Consecutiva a la 3359, manual forzando +1EV)

Objetivo	n	Gamma	k	n Ref	EV	EV Ref	R	G	B	Blanco	4094	255,875	
50mm	256	2,4	14	114	6	2,5850	1	0,2127	0,7152	0,0722	Negro	48	3
						2,67					Diferencia		252,875
						-2,5850							

$$E_v = \log_0 \frac{A^2}{T} = \log_0 \frac{BS_s}{K}$$

Observ.	ISO	Diaf.	T exp	EV log	Foto	LS-110	EV efec.	R	G	B	Rn	Gn	Bn	RnL	GnL	BnL	Brillo Y	BrilloL	BEV efect	Bmax	Bmin	B n	Error 1	B2n	Error B2n	LS110	Error 1 abs.
Multiseq.	200	22	3	6,33	IMGP3360	49	6,38	200	196	199	0,83	0,81	0,84	0,65	0,62	0,67	208,57	160,45	5,83	62,19	0,97	40,06	-18,25	54,19	-10,59	49,00	18,25
Multiseq.	200	22	3	6,33	MANUAL	40	6,38	200	196	199	0,78	0,77	0,78	0,57	0,55	0,57	197,07	141,26	5,83	62,19	0,97	35,47	-11,33	44,95	-12,39	40,00	11,33
Multiseq.	200	22	3	6,33	+1EV	31	6,38	185	180	180	0,72	0,70	0,70	0,48	0,45	0,45	181,06	116,92	5,83	62,19	0,97	29,65	-4,36	34,66	-11,81	31,00	4,36
Multiseq.	200	22	3	6,33	Luz natural	19,7	6,38	156	152	155	0,61	0,59	0,61	0,33	0,31	0,32	153,07	80,63	5,83	62,19	0,97	20,97	6,44	22,00	-11,65	19,70	6,44
Multiseq.	200	22	3	6,33	11h	8,3	6,38	132	133	136	0,52	0,52	0,53	0,23	0,23	0,24	133,00	59,31	5,83	62,19	0,97	15,87	10,61	15,88	-10,64	14,35	10,61
Multiseq.	200	22	3	6,33		5,25	6,38	101	108	108	0,39	0,42	0,42	0,13	0,15	0,15	106,51	36,86	5,83	62,19	0,97	10,50	26,54	10,32	-24,39	8,30	26,54
Multiseq.	200	22	3	6,33		2,25	6,38	73	72	70	0,28	0,28	0,27	0,07	0,06	0,06	72,07	16,43	5,83	62,19	0,97	5,62	7,00	5,90	-12,38	5,25	7,00
Multiseq.	200	22	3	6,33			6,38	40	34	34	0,16	0,13	0,13	0,02	0,02	0,02	35,28	4,33	5,83	62,19	0,97	2,73	21,12	3,25	-44,24	2,25	21,12



IMGP3360



Error medio	13,21 %
Error abs. máx.	26,54 %
Error abs. mín.	4,36 %



APROXIMACIÓN FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA CÓDIGO RGB / LUMINANCIA

PLANTILLA: 8 Grises  
 LUZ: LED  
 OBSERVACIONES:

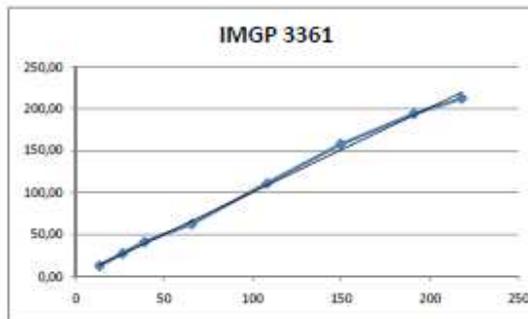
Objetivo	n	Gamma	k	n Ref	EV	EV Ref	R	G	B	Blanco	Negro	Diferencia
50mm	256	2,4	14	114	6	2,5850	1	0,2127	0,7152	0,0722	4094	255,875
						2,67	1	0,2990	0,5870	0,1140	48	3
						-2,5850	1	0,2127	0,7152	0,0722		252,875

$$E_s = \log_s \frac{A^2}{T} = \log_2 \frac{BS_s}{K}$$

Observ.	ISO	Diaf.	T exp	EV log	Foto	LS-110	EV efec.	R	G	B	Rn	Gn	Bn	RnL	GnL	BnL	Brillo Y	BrilloL	BEV efec.	Bmax	Bmin	B n	Error 1	B2n	Error B2n	LS110	Error 1 abs.
Multiseq.	200	22	0,3	9,66	IMGP3361	218	9,50	157	157	150	0,61	0,61	0,59	0,33	0,33	0,30	156,49	84,65	56,47	602,31	9,41	212,41	-2,56	225,24	-3,32	218,00	2,56
Multiseq.	200	22	0,3	9,66		191	9,50	151	150	143	0,59	0,59	0,56	0,31	0,30	0,27	149,71	76,79	56,47	602,31	9,41	194,22	1,68	201,72	-5,61	191,00	1,68
Multiseq.	200	22	0,3	9,66	LED	148,5	9,50	139	134	129	0,54	0,52	0,50	0,26	0,24	0,22	134,70	61,00	56,47	602,31	9,41	157,63	5,44	158,08	-5,74	149,50	5,44
Multiseq.	200	22	0,3	9,66		108	9,50	112	112	109	0,44	0,44	0,43	0,16	0,16	0,15	111,78	40,81	56,47	602,31	9,41	110,87	2,66	108,94	-0,87	108,00	2,66
Multiseq.	200	22	0,3	9,66		65,6	9,50	80	79	80	0,31	0,31	0,31	0,08	0,08	0,08	79,28	19,93	56,47	602,31	9,41	62,51	-4,71	64,25	2,05	65,60	4,71
Multiseq.	200	22	0,3	9,66		39	9,50	55	59	59	0,21	0,23	0,23	0,04	0,04	0,04	58,15	10,77	56,47	602,31	9,41	41,30	5,91	45,58	-16,87	39,00	5,91
Multiseq.	200	22	0,3	9,66		26,5	9,50	36	38	35	0,14	0,15	0,14	0,02	0,02	0,02	37,36	4,77	56,47	602,31	9,41	27,40	3,40	32,52	-22,70	26,50	3,40
Multiseq.	200	22	0,3	9,66		13,5	9,50	28	25	21	0,11	0,10	0,08	0,01	0,01	0,01	25,35	2,53	56,47	602,31	9,41	12,80	-5,21	26,75	-98,16	13,50	5,21



IMGP3361



Error medio	3,95 %
Error abs. máx.	5,91 %
Error abs. mín.	1,68 %



APROXIMACIÓN FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA CÓDIGO RGB / LUMINANCIA

PLANTILLA: 8 Grises  
 LUZ: LED  
 OBSERVACIONES: ISO 100

Objetivo	n	Gamma	k	n Ref	EV	EV Ref	R	G	B	Blanco	Negro	Diferencia
50mm	256	2,4	14	114	6	2,5850	1	0,2127	0,7152	0,0722	4094	255,875
						2,67	1	0,2990	0,5870	0,1140	48	3
						-2,5850	1	0,2127	0,7152	0,0722		252,875

$$E_s = \log_2 \frac{A^2}{T} = \log_2 \frac{BS_s}{K}$$

Observ.	ISO	Diaf.	T exp	EV log	Foto	LS-110	EV efec.	R	G	B	Rn	Gn	Bn	RnL	GnL	BnL	Brillo Y	BrilloL	BEV efect.	Bmax	Bmin	B n	Error 1	B2n	Error B2n	LS110	Error 1 abs.
Multiseq.	100	22	0,6	9,66	IMGP3362	218	9,50	158	156	150	0,62	0,61	0,59	0,34	0,33	0,30	155,99	84,06	56,47	602,31	9,41	211,03	-3,20	223,41	-2,48	218,00	3,20
Multiseq.	100	22	0,6	9,66		191	9,50	152	149	143	0,59	0,58	0,56	0,31	0,30	0,27	149,20	76,23	56,47	602,31	9,41	192,92	1,00	200,08	-4,75	191,00	1,00
Multiseq.	100	22	0,6	9,66	LED	148,5	9,50	137	134	129	0,54	0,52	0,50	0,25	0,24	0,22	134,28	60,56	56,47	602,31	9,41	156,63	4,77	156,99	-5,01	148,50	4,77
Multiseq.	100	22	0,6	9,66		108	9,50	111	109	108	0,43	0,43	0,42	0,16	0,15	0,15	109,35	38,94	56,47	602,31	9,41	106,55	-1,34	104,72	-3,04	108,00	1,34
Multiseq.	100	22	0,6	9,66		65,6	9,50	80	80	79	0,31	0,31	0,31	0,08	0,08	0,08	79,93	20,26	56,47	602,31	9,41	63,27	-3,55	64,93	1,02	65,60	3,55
Multiseq.	100	22	0,6	9,66		39	9,50	55	57	59	0,21	0,22	0,23	0,04	0,04	0,04	56,72	10,26	56,47	602,31	9,41	40,12	2,88	44,53	-14,19	39,00	2,88
Multiseq.	100	22	0,6	9,66		26,5	9,50	38	37	35	0,15	0,14	0,14	0,02	0,02	0,02	37,07	4,70	56,47	602,31	9,41	27,25	2,83	32,36	-22,13	26,50	2,83
Multiseq.	100	22	0,6	9,66		13,5	9,50	27	25	22	0,11	0,10	0,09	0,01	0,01	0,01	25,21	2,50	56,47	602,31	9,41	12,74	-5,65	26,69	-97,71	13,50	5,65



IMGP3362



Error medio	3,15 %
Error abs. máx.	5,65 %
Error abs. mín.	1,00 %



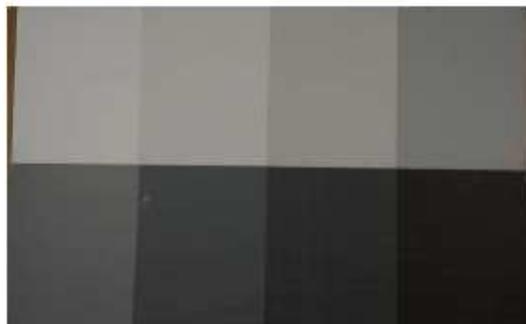
APROXIMACIÓN FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA CÓDIGO RGB / LUMINANCIA

PLANTILLA: 8 Grises.  
 LUZ: LED  
 OBSERVACIONES: ISO 400

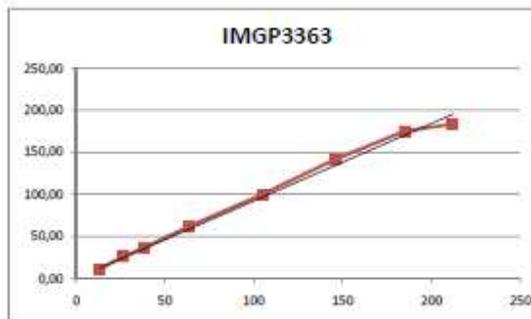
Objetivo	n	Gamma	k	n Ref	EV	EV Ref	R	G	B	Blanco	Negro	Diferencia
50mm	256	2,4	14	114	6	2,5850	1	0,2127	0,7152	0,0722	4094	255,875
						2,67	1	0,2990	0,5870	0,1140	48	3
						-2,5850	1	0,2127	0,7152	0,0722		252,875

$$E_v = \log_2 \frac{A^2}{T} = \log_2 \frac{HS_0}{K}$$

	ISO	Diaf.	T exp	EVLog	Foto	LS-110	EV efec.	R	G	B	Rn	Gn	Bn	RnL	GnL	BnL	Brillo Y	BrilloL	BEV efect	Bmax	Bmin	B n	Error	B2n	Error B2n	LS110	Error 1 abs.
Multiseg.	400	22	0,1667	9,50	IMG3363	212	9,50	156	153	149	0,61	0,60	0,58	0,33	0,32	0,30	153,35	80,95	50,82	542,08	8,47	183,46	-13,46	192,61	9,14	212,00	13,46
Multiseg.	400	22	0,1667	9,50		185	9,50	151	150	144	0,59	0,59	0,56	0,31	0,30	0,28	149,78	76,87	50,82	542,08	8,47	174,96	-5,43	181,76	1,75	185,00	5,43
Multiseg.	400	22	0,1667	9,50	LED	146,3	9,50	136	135	129	0,53	0,53	0,50	0,24	0,24	0,22	134,78	61,05	50,82	542,08	8,47	141,98	-2,95	142,45	2,63	146,30	2,95
Multiseg.	400	22	0,1667	9,50		105	9,50	112	112	109	0,44	0,44	0,43	0,16	0,16	0,15	111,78	40,81	50,82	542,08	8,47	99,78	-4,97	98,05	5,62	105,00	4,97
Multiseg.	400	22	0,1667	9,50		63,5	9,50	85	84	81	0,33	0,33	0,32	0,09	0,09	0,08	84,00	22,43	50,82	542,08	8,47	61,47	-3,20	62,43	1,68	63,50	3,20
Multiseg.	400	22	0,1667	9,50		38,5	9,50	56	56	56	0,22	0,23	0,22	0,04	0,04	0,04	57,43	10,51	50,82	542,08	8,47	36,63	-4,86	40,55	-5,31	38,50	4,86
Multiseg.	400	22	0,1667	9,50		26,7	9,50	42	40	39	0,16	0,16	0,15	0,02	0,02	0,02	40,35	5,46	50,82	542,08	8,47	26,11	-2,23	30,72	-15,07	26,70	2,23
Multiseg.	400	22	0,1667	9,50		13,5	9,50	27	24	22	0,11	0,09	0,09	0,01	0,01	0,01	24,49	2,39	50,82	542,08	8,47	11,24	-16,73	23,74	-75,88	13,50	16,73



IMG3363



Error medio	6,73 %
Error abs. máx.	16,73 %
Error abs. mín.	2,23 %



**APROXIMACIÓN FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA CÓDIGO RGB / LUMINANCIA**

PLANTILLA: Plantilla Sekonic

LUZ: LED

OBSERVACIONES: EXPOSICIÓN MANUAL

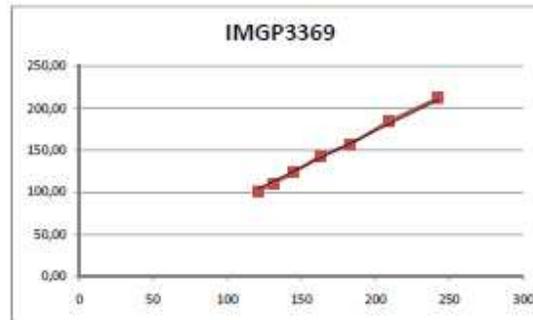
Objetivo	n	Gamma	k	n Ref	EV	EV Ref	R	G	B	Blanco	Negro	Diferencia
50mm	256	2,4	14	114	6	2,5850	1	0,2127	0,7152	0,0722	4094	255,875
						2,67	1	0,2990	0,5870	0,1140	48	3
						-2,5850	1	0,2127	0,7152	0,0722		252,875

$$E_v = \log_2 \frac{A^2}{T} = \log_2 \frac{BS_s}{K}$$

Observ.	ISO	Diaf.	T exp	EV log	Foto	LS-110	EV efec.	R	G	B	Rn	Gn	Bn	RnL	GnL	EnL	Brillo Y	BrilloL	BEV efect	Bmax	Bmin	B n	Error 1	B2n	Error B2n	LS110	Error 1 abs.
	200	22	0,2	10,24	IMGP3369	242,6	10,38	130	127	121	0,51	0,50	0,47	0,22	0,21	0,19	127,20	53,87	84,70	903,47	14,12	211,69	-12,74	209,93	13,47	242,60	12,74
	200	22	0,2	10,24	IMGP3369	209	10,38	120	118	112	0,47	0,46	0,44	0,19	0,18	0,16	117,99	45,82	84,70	903,47	14,12	183,72	-12,10	180,75	13,52	209,00	12,10
	200	22	0,2	10,24	IMGP3369	183	10,38	111	108	101	0,43	0,42	0,39	0,16	0,15	0,13	108,13	38,05	84,70	903,47	14,12	156,71	-14,37	154,00	15,85	183,00	14,37
	200	22	0,2	10,24	IMGP3369	163	10,38	104	103	96	0,41	0,40	0,38	0,14	0,13	0,12	102,71	34,11	84,70	903,47	14,12	143,04	-12,24	141,01	13,49	163,00	12,24
	200	22	0,2	10,24	IMGP3369	145	10,38	97	94	89	0,38	0,37	0,35	0,12	0,11	0,10	94,28	28,50	84,70	903,47	14,12	123,55	-14,79	122,96	15,20	145,00	14,79
	200	22	0,2	10,24	IMGP3369	131	10,38	90	88	81	0,35	0,34	0,32	0,10	0,10	0,08	87,92	24,65	84,70	903,47	14,12	110,19	-15,89	110,89	15,35	131,00	15,89
	200	22	0,2	10,24	IMGP3369	121	10,38	87	83	76	0,34	0,32	0,30	0,09	0,09	0,07	83,35	22,09	84,70	903,47	14,12	101,30	-16,28	102,95	14,92	121,00	16,28



IMGP3369



Error medio	14,06 %
Error abs. máx.	16,28 %
Error abs. mín.	12,10 %

**Observación:**  
 La exposición aquí es manual, con el EV efectivo el error cae. La máquina, en manual no pone el valor que ella ha medido sino el que nosotros ponemos. Lo más cercano es pues EV efectivo..

Sin embargo la linealidad es muy buena



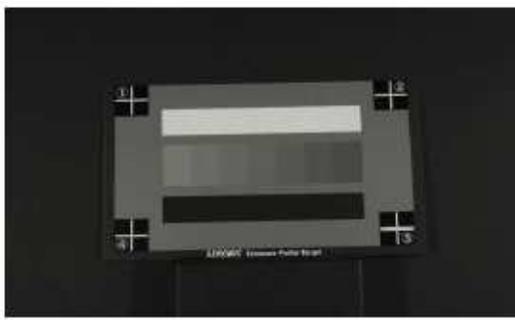
**APROXIMACIÓN FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA CÓDIGO RGB / LUMINANCIA**

**PLANTILLA:** Sekonic  
**LUZ:** LED  
**OBSERVACIONES:** EXPOSICIÓN AUTOMÁTICA PRIORIDAD APERTURA +0EV

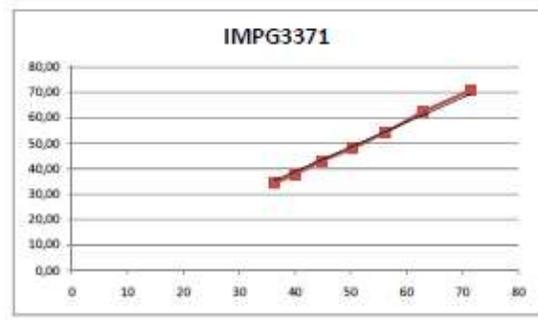
Objetivo	n	Gamma	k	n Ref	EV	EV Ref	R	G	B	Blanco	Negro	Diferencia
50mm	256	2,4	14	114	6	2,5850	1	0,2127	0,7152	0,0722	4094	255,875
						2,67	1	0,2990	0,5870	0,1140	48	3
						2,5850	1	0,2127	0,7152	0,0722		252,875

$$E_v = \log_2 \frac{A^2}{T} = \log_2 \frac{BS_s}{K}$$

Observ.	ISO	Diaf.	T exp	Ev log	Foto	LS-110	EV efec.	R	G	B	Rn	Gn	Bn	RnL	GnL	BnL	Brillo Y	BrilloL	BEV efect	Bmax	Bmin	B n	Error 1	B2n	Error B2n	LS110	Error 1 abs.
	200	22	0,5	8,92	IMGP3371	250	8,88	197	195	190	0,77	0,76	0,74	0,55	0,54	0,51	195,06	138,06	33,88	361,39	5,65	201,67	-19,33	252,88	-1,15	250,00	19,33
	200	22	0,5	8,92	IMGP3371	71,5	8,88	117	116	110	0,46	0,45	0,43	0,18	0,17	0,15	115,78	44,00	33,88	361,39	5,65	70,95	-0,77	69,75	2,45	71,50	0,77
	200	22	0,5	8,92	IMGP3371	62,8	8,88	109	108	102	0,43	0,42	0,40	0,15	0,15	0,13	107,78	37,77	33,88	361,39	5,65	62,30	-0,79	61,25	2,47	62,80	0,79
	200	22	0,5	8,92	IMGP3371	56,2	8,88	100	100	95	0,39	0,39	0,37	0,13	0,13	0,11	99,64	31,99	33,88	361,39	5,65	54,27	-3,43	53,66	4,52	56,20	3,43
	200	22	0,5	8,92	IMGP3371	50,31	8,88	93	93	88	0,36	0,36	0,34	0,11	0,11	0,10	92,64	27,47	33,88	361,39	5,65	47,99	-4,62	47,89	4,81	50,31	4,62
	200	22	0,5	8,92	IMGP3371	44,7	8,88	87	87	82	0,34	0,34	0,32	0,09	0,09	0,08	86,64	23,91	33,88	361,39	5,65	43,04	-3,72	43,44	2,81	44,70	3,72
	200	22	0,5	8,92	IMGP3371	39,9	8,88	80	80	76	0,31	0,31	0,30	0,08	0,08	0,07	79,71	20,15	33,88	361,39	5,65	37,81	-5,23	38,82	2,71	39,90	5,23
	200	22	0,5	8,92	IMGP3371	36,3	8,88	75	75	69	0,29	0,29	0,27	0,07	0,07	0,06	74,57	17,60	33,88	361,39	5,65	34,28	-5,58	35,71	1,63	36,30	5,58
	200	22	0,5	8,92	IMGP3371	10,05	8,88	26	25	26	0,10	0,10	0,10	0,01	0,01	0,01	25,28	2,51	33,88	361,39	5,65	7,65	-23,84	16,03	-99,55	10,05	23,84
gris arriba	200	22	0,5	8,92	IMGP3371	48	8,88	85	90	84	0,33	0,35	0,33	0,09	0,10	0,09	88,50	25,00	33,88	361,39	5,65	44,56	-7,18	44,78	6,71	48,00	7,18
gris izq	200	22	0,5	8,92	IMGP3371	55	8,88	95	96	94	0,37	0,38	0,37	0,11	0,12	0,11	95,64	29,36	33,88	361,39	5,65	50,61	-7,98	50,29	8,57	55,00	7,98
gris abajo	200	22	0,5	8,92	IMGP3371	49	8,88	91	93	88	0,36	0,36	0,34	0,10	0,11	0,10	92,21	27,21	33,88	361,39	5,65	47,62	-2,81	47,56	2,93	49,00	2,81
gris dcha	200	22	0,5	8,92	IMGP3371	54	8,88	95	98	92	0,37	0,38	0,36	0,11	0,12	0,11	96,93	30,20	33,88	361,39	5,65	51,78	-4,11	51,35	4,91	54,00	4,11



IMGP3371



Error medio	3,45 %
Error abs. máx.	5,58 %
Error abs. mín.	0,77 %



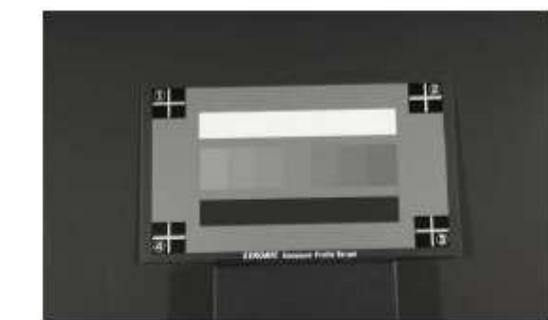
**APROXIMACIÓN FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA CÓDIGO RGB / LUMINANCIA**

PLANTILLA: Sekonic  
 LUZ: LED  
 OBSERVACIONES: EXPOSICIÓN AUTOMÁTICA PRIORIDAD APERTURA +1EV

Objetivo	n	Gamma	k	n Ref	EV	EV Ref	R	G	B	Blanco	4094	255,875	
50mm	256	2,4	14	114	6	2,5850	1	0,2127	0,7152	0,0722	Negro	48	3
						2,67	1	0,2990	0,5870	0,1140	Diferencia		252,875
						-2,5850	1	0,2127	0,7152	0,0722	(sRGB)		

$$E_v = \log_2 \frac{A^2}{T} = \log_2 \frac{BS_o}{K}$$

Observ.	ISO	Diap.	T exp	EV log	Foto	LS-110	EV efec.	R	G	B	Rn	Gn	Bn	RnL	GnL	BnL	Brillo Y	BrilloL	BEV efect	Bmax	Bmin	B n	Error 1	B2n	Error B2n	LS110	Error 1 abs.
200	22	1	1	7,92	IMG3372	250	8,88	243	243	240	0,95	0,95	0,94	0,89	0,89	0,86	242,78	226,07	16,94	180,69	2,82	161,98	-35,21	274,51	-9,80	250,00	35,21
200	22	1	1	7,92	IMG3372	71,5	8,88	161	159	154	0,63	0,62	0,60	0,35	0,34	0,32	159,06	87,74	16,94	180,69	2,82	65,87	-7,87	70,45	1,47	71,50	7,87
200	22	1	1	7,92	IMG3372	62,8	8,88	153	152	148	0,60	0,59	0,58	0,32	0,31	0,29	151,92	79,30	16,94	180,69	2,82	60,01	-4,45	62,74	0,10	62,80	4,45
200	22	1	1	7,92	IMG3372	56,2	8,88	149	147	143	0,58	0,57	0,56	0,30	0,29	0,27	147,14	73,93	16,94	180,69	2,82	56,27	0,13	58,04	-3,28	56,20	0,13
200	22	1	1	7,92	IMG3372	50,31	8,88	139	138	134	0,54	0,54	0,52	0,26	0,25	0,24	137,92	64,19	16,94	180,69	2,82	49,51	-1,60	49,97	0,67	50,31	1,60
200	22	1	1	7,92	IMG3372	44,7	8,88	134	132	128	0,52	0,52	0,50	0,24	0,23	0,21	132,14	58,48	16,94	180,69	2,82	45,54	1,88	45,49	-1,76	44,70	1,88
200	22	1	1	7,92	IMG3372	39,9	8,88	125	124	120	0,49	0,48	0,47	0,20	0,20	0,19	123,92	50,90	16,94	180,69	2,82	40,28	0,94	39,81	0,23	39,90	0,94
200	22	1	1	7,92	IMG3372	36,3	8,88	120	120	115	0,47	0,47	0,45	0,19	0,19	0,17	119,64	47,19	16,94	180,69	2,82	37,70	3,85	37,13	-2,29	36,30	3,85
200	22	1	1	7,92	IMG3372	10,05	8,88	48	47	48	0,19	0,18	0,19	0,03	0,03	0,03	47,28	7,28	16,94	180,69	2,82	9,96	-0,85	11,46	-14,04	10,05	0,85
gris arriba	200	22	1	7,92	IMG3372	48	8,88	136	135	132	0,53	0,53	0,52	0,24	0,24	0,23	135,00	61,26	16,94	180,69	2,82	47,47	-1,10	47,65	0,73	48,00	1,10
gris luz	200	22	1	7,92	IMG3372	55	8,88	142	142	136	0,55	0,55	0,53	0,27	0,27	0,24	141,57	67,95	16,94	180,69	2,82	52,12	-5,24	53,02	-3,60	55,00	5,24
gris abajo	200	22	1	7,92	IMG3372	-49	8,88	139	138	135	0,54	0,54	0,53	0,26	0,25	0,24	138,00	64,26	16,94	180,69	2,82	49,55	1,13	50,03	-2,11	49,00	1,13
gris osca	200	22	1	7,92	IMG3372	54	8,88	144	143	140	0,56	0,56	0,55	0,28	0,27	0,26	143,00	69,45	16,94	180,69	2,82	53,16	-1,56	54,27	-0,49	54,00	1,56



IMG3372



Error medio	1,96 %
Error abs. máx.	4,45 %
Error abs. mín.	0,13 %



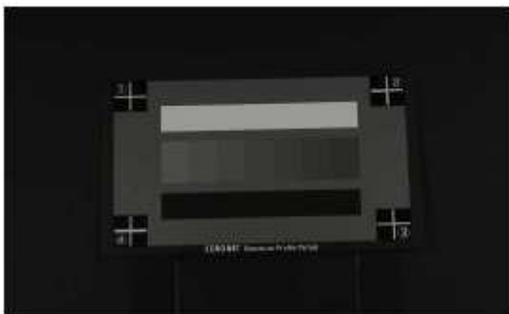
**APROXIMACIÓN FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA CÓDIGO RGB / LUMINANCIA**

PLANTILLA: Sekonic  
 LUZ: LED  
 OBSERVACIONES: EXPOSICIÓN AUTOMÁTICA PRIORIDAD APERTURA -1EV

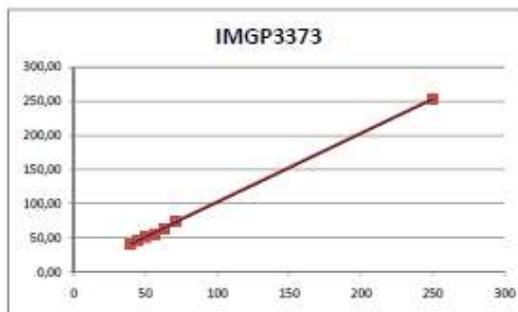
Objetivo	n	Gamma	k	n Ref	EV	EV Ref	R	G	B	Blanco	4094	255,875	
50mm	256	2,4	14	114	6	2,5850	1	0,2127	0,7152	0,0722	Negro	48	3
						2,67	1	0,2990	0,5870	0,1140	Diferencia		252,875
						-2,5850	1	0,2127	0,7152	0,0722	(Pentax)		
											(sRGB)		

$$E_v = \log_2 \frac{A^2}{T} = \log_2 \frac{BS_e}{K}$$

Observ.	ISO	Diaf.	T exp	EV log	Foto	LS-110	EV efec.	R	G	B	Rn	Gn	Bn	RnL	GnL	BnL	Brillo Y	BrilloL	BEV efect	Bmax	Bmin	B n	Error 1	B2n	Error B2n	LS110	Error 1 abs.
	200	20	0,2	9,97	IMGP3373	250	8,88	154	154	150	0,60	0,60	0,59	0,32	0,32	0,30	153,71	81,36	70	746,67	11,67	253,88	1,55	266,87	-6,75	250,00	1,55
	200	20	0,2	9,97	IMGP3373	71,5	8,88	79	77	69	0,31	0,30	0,27	0,08	0,07	0,06	76,85	18,72	70	746,67	11,67	74,03	3,53	76,56	-7,08	71,50	3,53
	200	20	0,2	9,97	IMGP3373	62,8	8,88	68	68	64	0,27	0,27	0,25	0,06	0,06	0,05	67,71	14,51	70	746,67	11,67	61,93	-1,38	66,00	-5,10	62,80	1,38
	200	20	0,2	9,97	IMGP3373	56,2	8,88	63	62	57	0,25	0,24	0,22	0,05	0,05	0,04	61,85	12,14	70	746,67	11,67	55,14	-1,89	60,01	-6,77	56,20	1,89
	200	20	0,2	9,97	IMGP3373	50,31	8,88	57	57	53	0,22	0,22	0,21	0,04	0,04	0,04	56,71	10,26	70	746,67	11,67	49,73	-1,15	55,20	-9,72	50,31	1,15
	200	20	0,2	9,97	IMGP3373	44,7	8,88	52	52	47	0,20	0,20	0,18	0,03	0,03	0,03	51,64	8,58	70	746,67	11,67	44,93	0,51	50,83	-13,72	44,70	0,51
	200	20	0,2	9,97	IMGP3373	39,9	8,88	47	46	44	0,18	0,18	0,17	0,03	0,03	0,03	46,07	6,94	70	746,67	11,67	40,20	0,75	46,43	-16,38	39,90	0,75
	200	20	0,2	9,97	IMGP3373	36,3	8,88	44	42	40	0,17	0,16	0,16	0,03	0,02	0,02	42,28	5,94	70	746,67	11,67	37,32	2,82	43,66	-20,29	36,30	2,82
	200	20	0,2	9,97	IMGP3373	10,05	8,88	16	15	13	0,06	0,06	0,05	0,01	0,00	0,00	15,07	1,22	70	746,67	11,67	12,12	20,56	28,06	-179,23	10,05	20,56
gris arriba	200	20	0,2	9,97	IMGP3373	48	8,88	53	53	48	0,21	0,21	0,19	0,04	0,04	0,03	52,64	8,90	70	746,67	11,67	45,84	-4,51	51,67	-7,64	48,00	4,51
gris izq	200	20	0,2	9,97	IMGP3373	55	8,88	58	60	55	0,23	0,23	0,21	0,04	0,04	0,04	59,21	11,15	70	746,67	11,67	52,30	-4,91	57,49	-4,53	55,00	4,91
gris abajo	200	20	0,2	9,97	IMGP3373	49	8,88	56	56	51	0,22	0,22	0,20	0,04	0,04	0,03	55,64	9,89	70	746,67	11,67	48,68	-0,66	54,25	-10,71	49,00	0,66
gris dcha	200	20	0,2	9,97	IMGP3373	54	8,88	59	58	56	0,23	0,23	0,22	0,04	0,04	0,04	58,07	10,73	70	746,67	11,67	51,10	-5,37	56,43	-4,50	54,00	5,37



IMGP3373



Error medio	1,54 %
Error abs. máx.	3,53 %
Error abs. mín.	0,51 %



**APROXIMACIÓN FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA CÓDIGO RGB / LUMINANCIA**

**PLANTILLA:** Sekonic Plantilla GRIS  
**LUZ:** LED  
**OBSERVACIONES:** EXPOSICIÓN AUTOMÁTICA PRIORIDAD APERTURA -1EV

Objetivo	n	Gamma	k	n Ref	EV	EV Ref	R	G	B	Blanco	4094	255,875	
50mm	256	2,4	14	114	6	2,5850	1	0,2127	0,7152	0,0722	Negro	48	3
						2,67	1	0,2990	0,5870	0,1140	(Pentax)	Diferencia	252,875
						-2,5850	1	0,2127	0,7152	0,0722	(sRGB)		

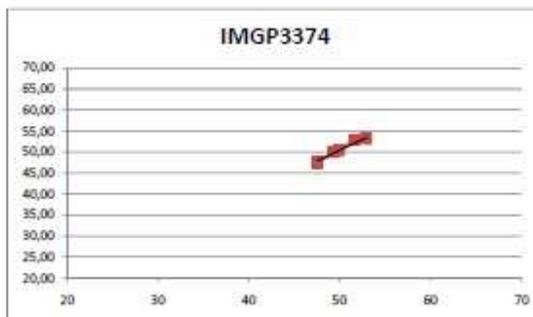
$$E_v = \log_2 \frac{A^2}{T} = \log_2 \frac{BS_s}{K}$$

Observ.	ISO	Diaf.	T exp	EV log	Foto	LS-110	EV efec.	R	G	B	Rn	Gn	Bn	RnL	GnL	BnL	Brillo Y	BrilloL	BEV efect.	Bmax	Bmin	B n	Error 1	B2n	Error B2n	LS110	Error 1 abs.
arriba	200	20	0,3	9,38	IMG33374	47,5	8,38	76	75	70	0,30	0,29	0,27	0,07	0,07	0,06	74,85	17,74	46,66667	497,78	7,78	47,47	-0,06	49,41	-4,02	47,50	0,06
abajo	200	20	0,3	9,38	IMG33374	49,4	8,38	77	78	73	0,30	0,30	0,29	0,07	0,08	0,07	77,43	18,99	46,66667	497,78	7,78	49,87	0,96	51,52	-4,30	49,40	0,96
centro	200	20	0,3	9,38	IMG33374	50	8,38	76	79	71	0,30	0,31	0,28	0,07	0,08	0,06	77,78	19,18	46,66667	497,78	7,78	50,24	0,48	51,82	-3,65	50,00	0,48
dcha	200	20	0,3	9,38	IMG33374	51,6	8,38	81	81	75	0,32	0,32	0,30	0,08	0,08	0,07	80,64	20,63	46,66667	497,78	7,78	53,01	2,73	54,28	-5,20	51,60	2,73
izquí	200	20	0,3	9,38	IMG33374	53	8,38	81	81	77	0,32	0,32	0,30	0,08	0,08	0,07	80,71	20,67	46,66667	497,78	7,78	53,08	0,15	54,35	-2,54	53,00	0,15

Sekonic.gris -1EV



IMGP3374



Error medio	0,88 %
Error abs. máx.	2,73 %
Error abs. mín.	0,06 %



**APROXIMACIÓN FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA CÓDIGO RGB / LUMINANCIA**

**PLANTILLA:** Sekonic Plantilla GRIS  
**LUZ:** LED  
**OBSERVACIONES:** EXPOSICIÓN AUTOMÁTICA PRIORIDAD APERTURA /DEV

Objetivo	n	Gamma	k	n Ref	EV	EV Ref	R	G	B	Blanco	Negro	Diferencia
50mm	256	2,4	14	114	6	2,5850	1	0,2127	0,7152	0,0722	4094	255,875
						2,67	1	0,2990	0,5870	0,1140	48	3
						-2,5850	1	0,2127	0,7152	0,0722		252,875

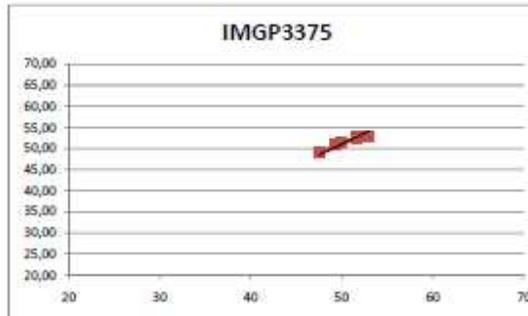
$$E_v = \log_2 \frac{A^2}{T} = \log_2 \frac{BS_s}{K}$$

Observ.	ISO	Diaf.	T exp	EV log	Foto	LS-110	EV efec.	R	G	B	Rn	Gn	Bn	RnL	GnL	BnL	Brillo Y	BrilloL	BEV efect	Bmax	Bmin	B n	Error 1	B2n	Error B2n	LS110	Error 1 abs.
centro	200	20	1	7,64	IMGP3375	50	7,60	155	155	154	0,61	0,61	0,60	0,32	0,32	0,32	154,93	82,78	14	149,33	2,33	51,59	3,18	54,44	-8,88	50,00	3,18
izqui	200	20	1	7,64	IMGP3375	53	7,60	157	157	154	0,61	0,61	0,60	0,33	0,33	0,32	156,78	84,98	14	149,33	2,33	52,85	-0,27	56,11	-5,86	53,00	0,27
dcha	200	20	1	7,64	IMGP3375	51,6	7,60	155	157	154	0,61	0,61	0,60	0,32	0,33	0,32	156,36	84,48	14	149,33	2,33	52,57	1,87	55,72	-7,98	51,60	1,87
arriba	200	20	1	7,64	IMGP3375	47,5	7,60	151	151	150	0,59	0,59	0,59	0,31	0,31	0,30	150,93	78,16	14	149,33	2,33	48,94	3,02	51,02	-7,40	47,50	3,02
abajo	200	20	1	7,64	IMGP3375	49,4	7,60	154	154	152	0,60	0,60	0,59	0,32	0,32	0,31	153,86	81,53	14	149,33	2,33	50,87	2,98	53,50	-8,30	49,40	2,98

Sekonic gris DEV



IMGP3375



Error medio	2,27 %
Error abs. máx.	3,18 %
Error abs. mín.	0,27 %



**APROXIMACIÓN FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA CÓDIGO RGB / LUMINANCIA**

**PLANTILLA:** Sekonic Plantilla GRIS  
**LUZ:** LED  
**OBSERVACIONES:** EXPOSICIÓN AUTOMÁTICA PRIORIDAD APERTURA +1EV

Objetivo	n	Gamma	k	n Ref	EV	EV Ref	R	G	B	Blanco	Negro	Diferencia
50mm	256	2,4	14	114	6	2,5850	1	0,2127	0,7152	0,0722	4094	255,875
						2,67	1	0,2990	0,5870	0,1140	48	3
						-2,5850	1	0,2127	0,7152	0,0722		252,875

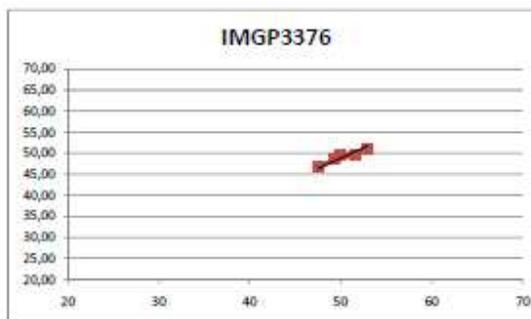
$$E_v = \log_2 \frac{A^2}{T} = \log_2 \frac{HS_0}{K}$$

Observ.	ISO	Diaf.	T exp	EV log	Foto	LS-110	EV efec.	R	G	B	Rn	Gn	Bn	RnL	GnL	BnL	Brillo Y	BrilloL	BEV efect	Bmax	Bmin	B n	Error 1	B2n	Error B2n	LS110	Error 1 abs.
centro	200	20	1,3	7,27	IMGP3376	50	8,25	173	173	170	0,68	0,68	0,66	0,41	0,41	0,40	172,78	105,35	10,76923	114,87	1,79	49,65	-0,69	55,97	-11,94	50,00	0,69
izqui	200	20	1,3	7,27	IMGP3376	53	8,25	176	175	171	0,69	0,68	0,67	0,43	0,42	0,40	174,92	108,27	10,76923	114,87	1,79	50,94	-3,88	57,95	-9,34	53,00	3,88
dcha	200	20	1,3	7,27	IMGP3376	51,6	8,25	173	173	170	0,68	0,68	0,66	0,41	0,41	0,40	172,78	105,35	10,76923	114,87	1,79	49,65	-3,77	55,97	-8,47	51,60	3,77
arriba	200	20	1,3	7,27	IMGP3376	47,5	8,25	169	168	165	0,66	0,66	0,64	0,39	0,39	0,37	168,00	98,99	10,76923	114,87	1,79	46,84	-1,38	51,78	-9,01	47,50	1,38
abajo	200	20	1,3	7,27	IMGP3376	49,4	8,25	173	171	169	0,68	0,67	0,66	0,41	0,40	0,39	171,28	103,33	10,76923	114,87	1,79	48,76	-1,29	54,62	-10,57	49,40	1,29

Sekonic gris +1EV



IMGP3376



Error medio	2,20 %
Error abs. máx.	3,88 %
Error abs. mín.	0,69 %



**APROXIMACIÓN FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA CÓDIGO RGB / LUMINANCIA**

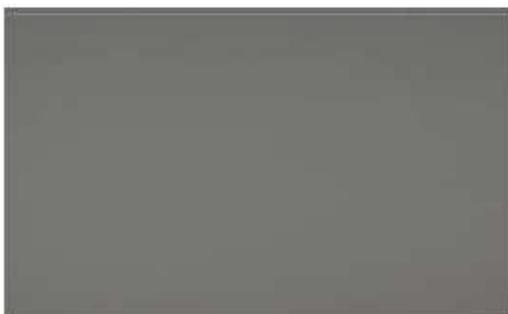
**PLANTILLA:** Plantillas GRIS1, GRIS2, NEGRA Y BLANCA  
**LUZ:** LED  
**OBSERVACIONES:** Prioridad apertura

Objetivo	n	Gamma	k	n Ref	EV	EV Ref	R	G	B	Blanco	4094	255,875	
50mm	256	2,4	14	114	6	2,5850	1	0,2127	0,7152	0,0722	Negro	48	3
						2,67	1	0,2990	0,5870	0,1140	Diferencia		252,875
						-2,5850	1	0,2127	0,7152	0,0722	(sRGB)		

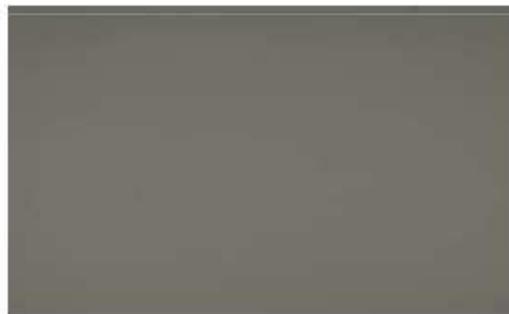
$$E_v = \log_2 \frac{A^2}{T} = \log_2 \frac{BS_v}{K}$$

Observ.	ISO	Diaf.	T exp	EV log	Foto	LS-110	EV efec.	R	G	B	Rn	Gn	Bn	RnL	GnL	BnL	Brillo Y	BrilloL	BEV efect	Bmax	Bmin	B n	Error 1	Bzn	Error Bzn	LS110	Error 1 abs.
GRIS 1	200	22	0,1	11,24	IMGF3377	366	11,25	119	118	115	0,46	0,46	0,45	0,18	0,18	0,17	118,00	45,81	169,40	1806,93	28,23	367,38	0,38	180,76	50,61	366,00	0,38
GRIS 2	200	22	0,1	11,24	IMGF3378	360	11,38	119	115	107	0,46	0,45	0,42	0,18	0,17	0,15	115,27	43,61	169,40	1806,93	28,23	352,07	-2,20	172,94	51,96	360,00	2,20
Negra	200	22	1	7,92	IMGF3379	31,5	8,00	108	110	106	0,42	0,43	0,41	0,15	0,15	0,14	109,29	38,90	16,94	180,69	2,82	31,93	1,37	15,69	50,19	31,50	1,37
Blanca	200	22	0,0769	11,62	IMGF3380	480	11,63	121	120	114	0,47	0,47	0,45	0,19	0,19	0,17	119,78	47,32	220,22	2349,01	36,70	491,20	2,33	241,90	49,60	480,00	2,33

Error medio	1,57 %
Error abs. máx.	2,33 %
Error abs. mín.	0,38 %



GRIS 1 IMGF3377



GRIS 2 IMGF3378



NEGRA IMGF3379



BLANCA IMGF3380

