

PREDICCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LA CONTAMINACIÓN LUMÍNICA.

**Propuesta de una metodología para
proyectos luminotécnicos de ingeniería**

Manuel García Gil

PREDICCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LA CONTAMINACIÓN LUMÍNICA.

Propuesta de una metodología para proyectos luminotécnicos de ingeniería

Manuel García Gil

Departament de Projectes d'Enginyeria

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB)

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

Director:

Dr. Carlos Sierra Garriga

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

Doctorado en Ingeniería de proyectos: Medio Ambiente, Seguridad, Calidad y Comunicación.

Tesis presentada para obtener el título de Doctor por la Universitat Politècnica de Catalunya

Barcelona, septiembre de 2015

© 2015. Manuel Garcia Gil

Reconocimiento – NoComercial (by-nc). Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.

A Ramón San Martín y a todos sus *followers*

RESUMEN:

Esta investigación tiene como principal objetivo desarrollar una metodología estructurada que permita poder predecir el impacto ambiental del alumbrado artificial nocturno. Para ello se ha dividido el proceso en diferentes etapas:

Inicialmente se ha realizado una recopilación exhaustiva de las investigaciones relacionadas sobre la cuantificación de las repercusiones de la luz en los seres vivos y el cielo. Estas cuantificaciones, se han vinculado con las tecnologías de los sistemas de alumbrado, con el objetivo de tener un núcleo fuerte de relación entre proceso investigador e implantación real de los proyectos de ingeniería. Ha sido necesario desarrollar métodos de cuantificación de la fuente contaminante, en las que se ha determinado la magnitud a nivel de proyecto singular, y de núcleo de población completo. Los datos extraídos para determinar esta magnitud contaminante, han sido luminotécnicas tradicionales: flujo lumínico contaminante y espectro de emisión de las fuentes de luz.

Para poder corroborar que los métodos de investigación y medida de la contaminación lumínica se pueden implantar en un proceso habitual, se han realizado mediciones y trabajo de campo en lo que hace referencia a: Medidas de luz intrusa en viviendas particulares, intrusión directa e indirecta en ecosistemas naturales, y medidas de brillo de cielo con diferentes dispositivos de medida y metodología (Sky Quality Meter, cámara AllSky, luminancímetro...). A través de estas mediciones se ha podido determinar que procesos pueden ser más aplicables, y cuáles son los puntos débiles y fuertes para su uso por personal técnico, pero no científico.

El resultado final de este trabajo se ha materializado en una metodología a poder aplicar en proyectos de alumbrado, que tiene como objetivo predecir la afectación de la contaminación lumínica, a la vez que sirva de herramienta para poder valorar diferentes alternativas, y poder promover en la protección del medio natural nocturno. El procedimiento está organizado en diferentes fases independientes entre sí, de forma que es fácilmente actualizable y escalable en función del desarrollo posterior de la ciencia.

PALABRAS CLAVE:

contaminación lumínica, alumbrado, iluminación exterior, impacto ambiental, proyectos de ingeniería.

ABSTRACT:

The research has as main goal to develop a structured methodology to be able to predict the environmental impact of artificial night lighting. For this reason, I have divided the process into different stages:

In the beginning it was conducted exhaustive compilation of investigations related to quantification of the effects of light on living organisms and sky. These quantifications, have been associated with the technologies of existing lighting systems, in order to have a strong core relationship between research process and actual implementation of engineering projects. It has been necessary to develop methods of quantifying the pollution source, which has been able to determine the magnitude unique project level, and full population core. Data extracted to determine the contaminant magnitude, have been traditional photometrics: luminous flux and spectrum of the light sources.

In order to corroborate that the research methods and measurement of light pollution can be implemented in a regular process, I have made measurements and fieldwork in what refers to: Measures obtrusive light to private homes, direct and indirect intrusion natural ecosystems, and measures brightness of the sky with different devices and methodology (Sky Quality Meter, AllSky camera, luminance meter ...). Through these measurements, it was determined that processes can be more interesting, and what are strengths and weaknesses to be used by technical personnel, although not expert.

The result of this work has been represented in a methodology to apply in lighting projects, which aims to predict the effect on light pollution, as well as serve as a tool to evaluate different alternatives and to promote protection of the night environment. The process is organized into separate phases, so that it is easily upgradeable and scalable depending on the subsequent development of science.

KEYWORDS:

Light pollution, outdoor lighting, light at night, environmental impact, engineering projects.

ÍNDICE DE CONTENIDOS.

ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
ÍNDICE DE TABLAS:	xix
GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ACRÓNIMOS:.....	xxi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Definición del problema de investigación.....	3
1.2. Justificación del problema objeto de investigación.....	10
1.3. Preguntas de investigación.....	13
1.4. Hipótesis.....	13
1.5. Objetivos.....	13
1.6. Alcance y límites.....	14
1.7. Resumen de la metodología utilizada.....	15
1.8. Estructura del documento de tesis.....	16
2. ESTADO DEL ARTE Y LA TÉCNICA.....	19
2.1 Contaminación Lumínica (CL).....	21
2.1.1 Definición de la problemática.....	21
2.1.2 Extensión de la CL.....	24
2.2 Afectaciones y repercusiones de la CL.....	28
2.2.1 Sobre el ecosistema natural.....	28
2.2.2 Sobre la hábitat humano.....	46
2.2.3 Sobre la oscuridad del cielo.....	51
2.3 Fuentes de la CL: Alumbrado artificial nocturno.....	54
2.3.1 Condiciones lumínicas y cantidad de luz.....	56
2.3.2 Sistemas de alumbrado.....	57
2.3.3 Variables de entorno.....	63
2.4 CL en proyectos de alumbrado.....	66
2.4.1 Evaluación del Impacto Ambiental.....	66
2.4.2 Reglamentación vigente.....	67
2.4.3 Un caso particular. El reglamento de Chile.....	75
2.5 Conclusiones del apartado.....	77
3. CUANTIFICACIÓN DE LA CL.....	79
3.1 Cuantificación sobre ecosistemas naturales.....	81
3.2 Cuantificación en la salud humana.....	85
3.2.1 Modelo de Yang Meng.....	85
3.2.2 Modelos del equipo de Mark S. Rea.....	86
3.2.3 La problemática de la medida.....	89
3.3 Cuantificación en el resplandor del cielo.....	90
3.3.1 Modelo de Walker.....	90
3.3.2 Modelo de Treanor.....	91
3.3.3 Modelo de Garstang.....	91
3.3.4 Modelo de Albers y Duriscoe.....	93
3.3.5 Primer Atlas de CL: Cinzano, Falchi y Elvidge.....	93
3.3.6 Modelo de Aubé.....	94
3.3.7 Modelo de Kocifaj.....	95
3.3.8 Iluminación horizontal a partir del brillo de la cúpula.....	96
3.3.9 Conclusiones de la consideración de modelos.....	98
3.4 Cuantificación del foco contaminante.....	99
3.4.1 Visión por satélite.....	99
3.4.2 Aproximaciones de emisiones de una ciudad.....	101
3.4.3 La cúpula celeste como foco contaminante.....	102
3.4.4 Influencia de las características de sistemas de alumbrado.....	102

3.4.5	Método RAMA-L.....	105
3.4.6	Modelización estadística de áreas urbanas (UUF).....	106
3.5	Conclusiones de este apartado.....	108
4.	METODOLOGÍA DEL TRABAJO DE CAMPO.	109
4.1	Generalidades.....	111
4.2	Selección de entorno de análisis.....	112
4.2.1	Área Metropolitana de Barcelona (AMB).....	112
4.2.2	Zona norte del Delta del Ebro.....	113
4.2.3	Parque Natural de Aracena y Picos de Aroche.....	114
4.3	Cálculo y caracterización del foco contaminante.....	114
4.4	Mediciones experimentales.....	116
4.4.1	Mediciones de fondo de cielo.....	116
4.4.2	Mediciones en espacios naturales.....	119
4.4.3	Mediciones en entornos urbanos.....	120
4.5	Cálculos sobre afectaciones.....	122
4.5.1	Cálculos luminotécnicos predictivos.....	122
4.5.2	Uso de imágenes de satélite.....	123
4.6	Extracción de resultados.....	125
5.	TRABAJO DE CAMPO.....	127
5.1	Área Metropolitana de Barcelona.....	129
5.1.1	Magnitud de foco contaminante.....	129
5.1.2	Medidas experimentales.....	132
5.1.3	Catálogo de especies.....	137
5.2	P. N. Aracena.....	137
5.2.1	Medidas experimentales.....	137
5.3	Sección norte del Delta del Ebro.....	138
5.3.1	Magnitud de foco contaminante.....	138
5.3.2	Medidas experimentales.....	139
5.3.3	Análisis vía satélite.....	142
5.3.1	Catálogo de especies.....	143
5.4	Viviendas y hábitat humano.....	143
5.5	Conclusiones.....	145
5.5.1	Respecto al equipo de medida.....	145
5.5.2	Respecto a las afectaciones observadas.....	147
5.5.3	A modo de conclusiones finales.....	147
6.	PROPUESTA DE METODOLOGIA DE PREDICCIÓN IMPACTO AMBIENTAL.....	149
6.1	Preliminares.....	151
6.1	Fase 0. Determinar alcance del impacto.....	155
6.1.1	Determinar las características principales de la instalación.....	155
6.1.2	Predicción del alcance del impacto ambiental.....	155
	Fase 1. Identificar los entornos de análisis y su sensibilidad.....	163
6.1.3	Entornos de hábitat humano.....	163
6.1.4	Entornos naturales según la sensibilidad.....	164
6.1.5	Observatorios del cielo según su sensibilidad.....	165
6.2	Fase 2. Caracterizar y determinar la magnitud del foco contaminante.....	166
6.3	Fase 3. Calcular la afectación ambiental.....	167
6.3.1	Afectación al entorno humano.....	167
6.3.2	Afectación a ecosistemas.....	168
6.3.3	Afectación a observación del cielo.....	169
6.4	Fase 4. Determinar el impacto ambiental (fichas resumen).....	170

7. CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE TRABAJOS DE FUTURO.	187
AGRADECIMIENTOS.	195
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	197

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1.1 Cuadro “Young man Reading by candlelight”. De Matthias Stom (Wikipedia 2015)	3
Figura 1.2 y 1.3 Iluminación de una fábrica (Kalipedia 2012) y cosecha con luz de arco eléctrico en 1882 (Carolyn 2015).....	5
Figura 1.4 Consumo de energía en las ciudades y evolución, miles. Elaboración propia a partir de fuente original: (Tyler Miller 1996).....	6
Figura 1.5 Diagrama básico de las funciones en el servicio de alumbrado (García Gil, San Martín Paramo et al. 2012)	7
Figura 1.6 Repercusiones medioambientales en el alumbrado (San Martín Páramo 2007, García Gil, San Martín Paramo et al. 2012)	7
Figura 1.7 y 1.8 .Resplandor luminoso del Área Metropolitana de Barcelona (García 2010) y zorro deslumbrado por la luz de nuestro vehículo (García Gil and Estrada García 2014).....	8
Figura 1.9 Esquema de cómo afecta la contaminación lumínica de diferentes tipos de luminarias (Nixon 2015)	9
Figura 1.10 Incremento del brillo luminoso debido al encendido de un campo deportivo diseñado según todas las recomendaciones oficiales (García Gil 2012).....	9
Figura 1.11 Evolución esperada de la eficacia de las fuentes de luz (García Gil 2013).....	10
Figura 1.12 y 1.13 .Evolución de consumo energético en Madrid según diferentes fuentes y en general de España(Sánchez de Miguel, Zamorano et al. 2014).....	12
Figura 1.14 . Aumento del brillo detectado por satélite en Andalucía desde el año 1992 al año 2007 (JUNTA-Andalucía 2015)	12
Figura 2.1 . Ilustración de “The first World Atlas of the artificial night sky brightness” (Cinzano, Falchi et al. 2001)	21
Figura 2.2 . Foto montaje de la Tierra de noche (Mayhew and Simmon 2000)	24
Figura 2.3 . Ilustración de toda la Tierra de “The first World Atlas of the artificial night sky brightness” (Cinzano, Falchi et al. 2001).....	25
Figura 2.4 . Evolución esperada según la tendencia actual para la CL en Estados Unidos, con ilustración de Cinzano a partir de (National_Park_Service_U.S. 2013).....	26
Figura 2.5 Incremento del brillo detectado en satélite en Europa entre 1995-2000 y 2005-2010 (Beniie J., Davies T.W. et al. 2014)	27
Figura 2.6 Esquemmatización de las afectaciones de la CL.....	28
Figura 2.7 Diferentes tipologías de especies de vertebrados según su procedencia y actividad nocturna (Holker, Wolter et al. 2010)	29
Figura 2.8 Imagen ilustrativa de algunas repercusiones de la CL en ecosistemas (Longcore 2004)	30
Figura 2.9 Comparación de la sensibilidad en el espectro visible de los humanos e insectos (Dolsa and Albarrán 1998).....	31
Figura 2.10 Imagen que da nombre a la campaña sobre Escotobiología	32
Figura 2.11 Observación ciudadana del cambio en el proceso de pérdida de hojas de un árbol (Kyba 2014).....	32
Figura 2.12 Efecto de fijación o cautividad (Rich and Longcore 2006).....	33
Figura 2.13 Efecto barrera (Rich and Longcore 2006).....	34

Figura 2.14 Pérdida de orientación por confusión de la ubicación de la Luna ante otro elemento brillante. (Rich and Longcore 2006).....	35
Figura 2.15 Imagen de los experimentos realizados en el artículo “Dung Beetles use the Milky Way for orientation”. (Dacke, Baird et al. 2013).....	35
Figura 2.16 Modificación de las posibilidades predatoras de especies (Gaston, Duffy et al. 2014)	36
Figura 2.17 Atracción de las ranas ante una vela, observado en 1901 por William J Long. (Longcore 2004)	37
Figura 2.18 Recuento de aves en Toronto (ETIBETAS 2009).....	38
Figura 2.19 Efecto de los faros sobre las aves (Montevecchi 2006).....	38
Figura 2.20 Modificación del camino que siguen las crías al nacer (Gaston, Duffy et al. 2014).....	40
Figura 2.21 Modificación de la ruta de las tortugas neonatas en función de la fase de la luna (Berry, Booth et al. 2013).....	41
Figura 2.22 Modificación de la ruta de las tortugas neonatas en función de la fase de la luna y luces en su entorno (Berry, Booth et al. 2013)	41
Figura 2.23 y Figura 2.24 . Algas luminiscentes en el sudeste asiático(Hart 2015) y luciérnagas en Illinoiois (Illinois_Coalition_for_Responsible_Outdoor_Lighting 2011).....	45
Figura 2.25. y 2.26. Café Terrace at Night (Vincent Vang Gogh) y pirámide escalonada de Teotihuacan para observaciones astronómicas (STARLIGHT 2007).....	47
Figura 2.27. Saturno visto desde el telescopio Hubble NASA. ® (STARLIGHT 2007).	47
Figura 2.28. Iluminación de plaza pública. Gran nivel y deslumbrante. Elaboración propia	48
Figura 2.29. Montajes fotográficos ejemplo alumbrado deslumbrante (GEORGIA_SEA_TURTLE_CENTER 2013).	48
Figura 2.30. Primeros datos para determinar la sensibilidad de las células descubiertas en 2001 (Brainard. 2001).....	49
Figura 2.31. Función de eficiencia de las diferentes células del ojo humano (Rea 2015).....	49
Figura 2.32. Sistema circadiano. Entradas y salidas responsables (Bonmati-Carrion, Arguelles-Prieto et al. 2014).....	50
Figura 2.33 y 2.34 Imagen de cielo en Parque Natural Aracena y Picos de Aroche y en zona deportiva de Barcelona.....	51
Figura 2.35 Imagen en colores falsos de la influencia de Las Vegas situada a 112 km. (National_Park_Service_U.S. 2013).....	52
Figura 2.36 Ejemplos de brillo del cielo observado en diferentes condiciones de nubes. Hay un incremento de hasta 10 veces el brillo del cielo debido a este factor.(Kyba, Ruhtz et al. 2011)...	53
Figura 2.37 Proceso básico en el diseño de un proyecto de alumbrado artificial (García Gil, San Martín Paramo et al. 2012).....	54
Figura 2.38 Procedencia de luz artificial nocturna (Celfosc.org 2001).....	55
Figura 2.39 Imágenes de la ISS donde se ven puntos blancos caóticamente distribuidos, testimonio de la industria pesquera entre Japón y Corea del Sur (Günter 2015).....	55
Figura 2.39 Valores de eficiencia respecto a la uniformidad, en función de diferentes soluciones lumínicas aplicadas en un proyecto (Gómez-Lorente, Rabaza et al. 2013).....	56
Figura 2.40 Muestras de diferentes fotometrías (Relux 2015)	59

Figura 2.41 Esquematación de Factor de utilización hacia acera (Fu2) y calzada (Fu1) (Garcia Gil, San Martin Paramo et al. 2012)	60
Figura 2.42 Esquema de distribución del factor de utilización según su altura de implantación h (INDAL 2002)	61
Figura 2.43 Diferentes ángulos de la emisión de la luz en función de la dirección del flujo lumínico , en sección (Garcia Gil, San Martin Paramo et al. 2012).....	63
Figura 2.44 Caracterización de flujo lumínico útil, proporcionando servicio allá donde es necesario. (Garcia Gil, San Martin Paramo et al. 2012).....	64
Figura 2.45 Mapa de zonificación de CL en Catalunya(GENCAT 2014).....	70
Figura 3.1 Niveles lumínicos naturales y referencia de algunos efectos naturales a la derecha con flechas (Gaston, Duffy et al. 2014)	81
Figura 3.2 Diferencias de emisión espectral de la luz de la Luna y un ejemplo de iluminación nocturna artificial (Le Tallec, Perret et al. 2013)	83
Figura 3.3 Diferentes tipos de visión de varios seres vivos (Perkin, Hölker et al. 2011)	84
Figura 3.4 Caminos sinérgicos de conos/bastones y ipRGCs. La línea continua indica efecto positivo y la discontinua efecto negativo (Meng, He et al. 2011).	85
Figura 3.5 Supresión de melatonina en función de diferentes fuentes experimentales realizadas (Rea, Figueiro et al. 2005).....	87
Figura 3.6 Curvas de sensibilidad estándares de cada fotopigmento (CIE 2015).....	89
Figura 3.7 Esquema de cómo se calculan las distancias hacia el punto de observación según el modelo de (Treanor 1973)	91
Figura 3.8 Esquema de cómo se calculan las distancias hacia el punto de observación según el modelo de Garstang (Garstang 1986)	92
Figura 3.9 Mapa de CL según modelo (Albers and Duriscoe 2001)	93
Figura 3.10 Imagen del "The first world atlas of artificial night sky brightness" (Cinzano, Falchi et al. 2001)	94
Figura 3.11 Esquema del modelo de Aubé (Aube, Franchomme-Fosse et al. 2005).....	95
Figura 3.12 Esquema geométrico del modelo de Kocifaj con nubes (Kocifaj 2007)	96
Figura 3.13 Ilustración de cómo se calcula el nivel lumínico en el suelo en función del brillo de la cúpula celeste.....	97
Figura 3.14 Diferentes escalas de evaluación de la visión del cielo estrellado en función de su brillo (Spoelstra 2013).....	99
Figura 3.15 Distribución angular de la salida de emisión hacia el cielo (línea continua) por el modelo de Garstang (Garstang 1986), extraído de (Luginbuhl, Duriscoe et al. 2009). Consideración de emisión Lambertiana para un F.H.I. del 90% (línea discontinua a rayas) y con un 15% de reflectancia y un F.H.S.I. del 10% (línea punteada).....	100
Figura 3.16 Noticia en El Pais digital, en portada el día 20-oct-2014 (Perez García 2014).....	101
Figura 3.17 Incremento de brillo del cielo potencial de una fuente de luz respecto a Vapor Sodio a Baja Presión (Luginbuhl, Boley et al. 2013) para una longitud de onda de 550 nm, cerca del horizonte.....	104
Figura 3.18 Esquematación tipo de una sección de calle (Garcia Gil 2012).....	105
Figura 3.19 Flujo que escapa de una ciudad en lúmenes (Garcia Gil 2012).....	107
Figura 4.1 Esquema de la metodología experimental	111

Figura 4.2 Datos globales del Área Metropolitana de Barcelona. Elaboración propia a partir de (AMB 2014)	112
Figura 4.3 Mapa general del Delta del Ebro (P.N.Delta-Ebro 2015)	113
Figura 4.4 Mapa general del P.N. Sierra de Aracena y picos de Aroche (WIKANDA 2015).....	114
Figura 4.5 Inspección de campo en P. N. Aracena.....	115
Figura 4.6. Muestra de vehículo con el sensor instalado para circular y registrar medidas.....	117
Figura 4.7. Proceso de obtención de resultados(ITEC 2014)	117
Figura 4.8. Iluminancia monocromática para varios filtros estudiados, en el método de la Universidad de Granada(Rabaza, Aznar-Dols et al. 2014).	118
Figura 4.8. Imagen tomada con filtro R y análisis de Irradiancia (Rabaza, Galadí-Enríquez et al. 2010).	118
Figura 4.8. Medidas obtenidas con ASTMON en los filtros fotométricos Johnson B (izda.), R (centro) y V (dcha.)	119
Figura 4.9. Imagen zona de estudio (Espacio natural del Remolar)	120
Figura 4.10. Esquemización de medidas de iluminancia horizontal vertical y luminancia respectivamente.	120
Figura 4.11. Muestra de calibración de la cámara Nikon Coolpix 990 en la Giralda de Sevilla (García Gil 2011).....	121
Figura 4.12. Esquema de metodología para la determinación de valores aproximados de luz intrusa en fachadas	122
Figura 4.13. Ejemplo de simulación de un vial cercano a zonas de nidificación en el Delta del Ebro (Gómez Fernández 2015).....	123
Figura 4.14., 4.15., 4.16. Selección de celdas de cálculo de núcleo de Deltebre y Riumar y ejemplo de resultado de medición realizado por el equipo del artículo (Estrada-García, García-Gil et al. 2015).	124
Figura 5.1. Distribución de potencia instalada en alumbrado público en AMB (Elaboración propia)	131
Figura 5.2. Magnitud contaminante en alumbrado público en AMB (en lúmenes) (Elaboración propia).....	131
Figura 5.3. Mediciones de fondo de cielo con SQM-LU-DL en el AMB (Elaboración propia).....	132
Figura 5.4. Imagen y mapa de brillo de cielo de ASTMON P.N. Garraf (Elaboración propia)	134
Figura 5.5. Ficha tipo de medida de afectación directa debido a la autopista A-2	135
Figura 5.6. Representación de niveles lumínicos en zona medida.	136
Figura 5.7. Toma de datos en P.N. Aracena y Picos de Aroche	137
Figura 5.8. Ejemplo de primeras medidas de extensión geográfica realizadas en todo el Delta del Ebro	139
Figura 5.9. Ilustración de las mediciones realizadas en Deltebre (años 2013 y 2014)	142
Figura 5.10. Ejemplo de análisis de luz intrusa a 5 metros de altura en Barcelona (Casas Fernandez 2015)	144
Figura 5.11. Ejemplo cálculo luminotécnico de cálculo de luz intrusa.	144
Figura 6.1 Ejemplo de valoración del Triskel del impacto de la CL (García Gil 2012)	151

Figura 6.2 Estructura general de la propuesta de metodología de predicción del Impacto Ambiental Lumínico.....	153
Figura 6.3 Predicción PRELIMINAR del impacto ambiental potencial para observatorios astronómicos. Elaboración propia a partir de modelo (Kocifaj 2007)	156
Figura 6.4 Predicción PRELIMINAR del impacto ambiental potencial para ecosistemas. Elaboración propia a partir de modelos (Kocifaj 2007, Kocifaj 2014, Kocifaj and Solano 2014)	160
Figura 6.5 Diferentes espectros de emisión (Tapia, Sanchez de Miguel et al. 2015).....	166
Figura 6.6 Instalación típica de alumbrado exterior y sus variables para el estudio (Estrada Garcia 2013)	167
Figura 6.7 y 6.8 Método de cálculo de luz intrusa en domicilios a partir de programas de cálculo lumínico.....	168
Figura 6.9 Reducción de nivel de melatonina en función de la tipología de fuente de luz y el nivel lumínico. Elaboración propia a partir de (Rea, Figueiro et al. 2005, Rea, Figueiro et al. 2007, Rea, Figueiro et al. 2010).....	173
Figura 6.10 Reducción de oscuridad de fondo de cielo predicha, en función de la fuente contaminante, distancia del observador y para fuente de luz tipo Vapor Sodio a Baja Presión. Elaboración propia a partir del modelo (Kocifaj 2007, Tapia, Sanchez de Miguel et al. 2015). ...	179
Figura 6.11 Reducción de oscuridad de fondo de cielo predicha, en función de la fuente contaminante, distancia del observador y para fuente de luz tipo Vapor Sodio a Alta Presión. Elaboración propia a partir del modelo (Kocifaj 2007). (Tapia, Sanchez de Miguel et al. 2015)..	180
Figura 6.12 Reducción de oscuridad de fondo de cielo predicha, en función de la fuente contaminante, distancia del observador y para fuente de luz tipo luz blanca cálida (T=3100K). Elaboración propia a partir del modelo (Kocifaj 2007). (Tapia, Sanchez de Miguel et al. 2015)..	181
Figura 6.13 Reducción de oscuridad de fondo de cielo predicha, en función de la fuente contaminante, distancia del observador y para luz blanca neutra (T=4200K). Elaboración propia a partir del modelo (Kocifaj 2007). (Tapia, Sanchez de Miguel et al. 2015).....	182
Figura 6.14 Reducción de oscuridad de fondo de cielo predicha, en función de la fuente contaminante, distancia del observador y para fuente de luz blanca fría (T=5900K). Elaboración propia a partir del modelo (Kocifaj 2007). (Tapia, Sanchez de Miguel et al. 2015).....	183
Figura 6.15 Reducción de oscuridad de fondo de cielo predicha, en función de la fuente contaminante, distancia del observador y para fuente de luz tipo LED PC-Ámbar. Elaboración propia a partir del modelo (Kocifaj 2007).....	184
Figura 6.16 Mapa de fondo de cielo ejemplo 1. Elaboración propia a partir del modelo (Kocifaj 2007).....	185
Figura 6.17 Mapa de fondo de cielo ejemplo 1. Elaboración propia a partir del modelo (Kocifaj 2007).....	186



ÍNDICE DE TABLAS:

Tabla 2.1 Clasificación de luminarias viales según su fotometría típica (Directamente de (Estrada-García, García-Gil et al. 2015)).....	62
Tabla 2.2 Reglamentaciones sobre CL en España (García Gil, San Martín Paramo et al. 2012).....	67
Tabla 2.3 Algunas reglamentaciones o normativas sobre CL en el mundo (García Gil, San Martín Paramo et al. 2012).....	68
Tabla 2.4 Zonificación típica de las reglamentaciones de CL (García Gil, San Martín Paramo et al. 2012) y basado en la Norma CIE-150 (CIE 2003) y CIE-127 (CIE 1997).....	69
Tabla 2.5 Descripción de subzonas medioambientales. Traducción del autor a partir de la fuente (Narisada and Schreuder 2004).....	70
Tabla 2.6 Descripción de subzonas para actividades astronómicas. Traducción del autor a partir de la fuente (Narisada and Schreuder 2004).....	71
Tabla 2.7 Limitaciones de lámparas en el D82/2005, derogado (GENCAT 2005).....	72
Tabla 2.8 Limitaciones de lámparas en el nuevo proyecto de reglamento de CL en (GENCAT 2014).....	72
Tabla 2.9 Limitaciones para luminarias (MINISTERIO-DE-INDUSTRIA 2008).....	73
Tabla 2.10 Limitaciones de luminarias en el D82/2005, derogado (GENCAT 2005).....	73
Tabla 2.11 Limitaciones para luminarias en proyecto de ley (GENCAT 2014).....	73
Tabla 2.12 Limitaciones de luminarias en el D357/2010 (CONSEJERIA-DE-MEDIO-AMBIENTE 2010).....	74
Tabla 2.13 Limitaciones luz intrusa (MINISTERIO-DE-INDUSTRIA 2008).....	74
Tabla 2.14 Limitaciones de luz intrusa a zonas naturales en el D82/2005, derogado (GENCAT 2005).....	75
Tabla 2.15 Limitaciones de luz intrusa a viviendas en el D82/2005, derogado (GENCAT 2005).....	75
Tabla 3.1 Tabla 3 del artículo sobre efectos de ciertos niveles lumínicos en animales (Gaston, Bennie et al. 2013).....	82
Tabla 3.2 Valor observado de AF, y medido mediante filtros en SQM. Elaboración propia a partir de (Kyba, Ruhtz et al. 2012):.....	97
Tabla 3.3 Proporción de brillo en el cielo de luminarias de 0% al 10%, medido en observatorios a 50, 100 y 400 km. Elaboración propia a partir de (Luginbuhl, Walker et al. 2009).....	103
Tabla 3.4 Características fotométricas de las lámparas en iluminación directa (Aubé, Roby et al. 2013).....	104
Tabla 5.1 Resultado final del UUF calculado en el A.M.B. en alumbrado público.	130
Tabla 5.2 Ficha tipo de medidas de fondo de cielo en ubicación 1: Carretera de Molins.....	133
Tabla 5.3 Predicción de disminución del flujo lumínico emitido por los dos núcleos de población de Deltebre.....	139
Tabla 5.4 Ficha tipo de medidas de fondo de cielo en ubicación: Deltebre.....	141
Tabla 5.5 Comparación de resultados finales obtenidos en Deltebre y Riumar.	142
Tabla 5.6 Extracción del Anexo K. Nivel de luz intrusa máximo calculado por encima de 4 metros en luminarias tipo F (viales con cierre plano. F.H.S.i<1%).....	145

Tabla 6.1 Zonificación típica de las reglamentaciones de CL (Garcia Gil, San Martin Paramo et al. 2012) y basado en la Norma CIE-150 (CIE 2003) y CIE-127 (CIE 1997).....	163
Tabla 6.2 Descripción de subzonas medioambientales. Traducción del autor a partir de la fuente (Narisada and Schreuder 2004).....	164
Tabla 6.3 Descripción de subzonas para actividades astronómicas. Traducción del autor a partir de la fuente (Narisada and Schreuder 2004)	165

GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ACRÓNIMOS:

AF		En inglés: Amplification Factor. Corresponde a un factor multiplicador de la contaminación lumínica debido a la cobertura de nubes.
Afectación ambiental	medio	Diferencia entre el estado que tendría el factor ambiental por cambio natural y el que previsiblemente tendrá cuando se lleve a cabo la actividad. Suele estar definida por magnitudes físicas, químicas, o similares, que sirven para valorar el estado de un entorno.
candela/m2 [cd/m²]		Unidad de medida de la luminancia en Sistema Internacional.
CEI		Comité Español de Iluminación Organismo afiliado en el C.I.E., implantado en España.
Celfosc		Asociación contra la contaminación lumínica de en España.
CIE		Commission Internationale de l'Eclairage. Máximo exponente de organización a nivel mundial que promueve normativa y organización en el ámbito del alumbrado y la iluminación.
CitiesatNight		Programa de ciencia ciudadana que tiene como objetivo la clasificación y ubicación de imágenes nocturnas de la Tierra, para su posterior procesamiento y trabajo científico.
CL		Contaminación Lumínica
Darksky		Organización internacional que trabaja para proteger y promover los cielos nocturnos para generaciones presentes y futuras.
DMSP		Satélite Defense Meteorological Satellite Program
Eh		Nivel de iluminancia horizontal [lx].
EFS		Emisión de Flujo Superior: Cantidad de flujo lumínico que escapa de una instalación de alumbrado hacia el cielo

Escotobiología	Ciencia que estudia la biología de la noche y cubre diferentes áreas de investigación: Animales, insectos, aves, plantas, salud humana, sociología... Persigue el reconocimiento y la necesidad de considerar la oscuridad de la noche, como un elemento más en los ecosistemas.
Flicker, efecto	Efecto parpadeo que ocasiona una fuente de luz, debido a su frecuencia eléctrica, malfuncionamiento o naturaleza de la fuente.
FHI(%)	Flujo Hemisférico Inferior: Es el porcentaje de luz de una luminaria que se emite hacia el hemisferio inferior respecto al total que sale de una lámpara
FHS(%)	Flujo Hemisférico Superior: Es el porcentaje de luz de una luminaria que se emite hacia el hemisferio superior respecto al total que sale de una lámpara
FHSi(%)	Flujo Hemisférico Superior instalado: Es el porcentaje de luz de una luminaria que se emite hacia el hemisferio superior respecto al total que sale de una luminaria.
Impacto Ambiental	<p>Cualquier acción transformadora o cambio ocasionada directa o indirectamente por las actividades, productos o servicios de una organización en el medio ambiente, sea perjudicial o no.</p> <p>Un efecto no produce siempre la misma gravedad en las consecuencias, depende del medio en el cual se ejecuta la acción.</p>
ipRGC	En inglés, intrinsically photosensitive Retinal Ganglion Cells. Células ganglionares fotorreceptores presentes en la retina del ojo, y que son responsables de enviar información al hipotálamo para poder sincronizar los ciclos circadianos.
ISS	En inglés, International Space Station. En castellano Estación Espacial Internacional.
HDR o HDRI	En inglés, High Dynamic Range Imaging. Rango dinámico de imagen que es utilizado en fotografía digital para mejorar los rangos de exposición de imagen con diferentes fotografías y un proceso informático posterior.

HM	Halogenuros metálicos. Tipo de lámpara.
LED	Light Emitting Diode. Tipo de lámpara.
LOR	En Inglés: Lighting Output Ratio. En castellano es equivalente al rendimiento de la luminaria.
LoNNE	En inglés: Lost of the Night Network. Red europea de investigación sobre contaminación lumínica
lúmen [lm]	Unidad de medida del flujo lumínico en Sistema Internacional
lux [lx]	Unidad de medida de la iluminancia en Sistema Internacional.
mag/arcseg²	Unidad de medida de oscuridad de la cúpula celeste. Magnitudes por arco segundo al cuadrado.
MATLAB®	Programa informático, en el que se puede programar mediante un lenguaje de alto nivel y entorno interactivo para el procesamiento de señales, imágenes, comunicaciones, sistemas de control y finanzas.
melanopsina	Fotopigmento responsable de la fotosensibilidad de las ipRGCs en humanos y otros mamíferos.
Número de Garstang	Constante considerada para el cálculo de luz emitida por un núcleo de población. El valor que se ha considerado tradicionalmente como 1000 lúmenes por habitantes. También es conocido como número de Walker.
Okta	Magnitud que indica de 0 a 8, en números enteros, la cobertura de nubes del cielo. Va de 0: Totalmente descubierto a 8: Totalmente cubierto.
Potencia eléctrica instalada	Potencia nominal, pero que tiene en cuenta la energía consumida por los equipos auxiliares necesarios para la ejecución del servicio demandado. En el caso de sistemas de alumbrado se tiene en cuenta energía consumida de fuente de luz, reactancias, etc. La unidad es el Watt y puede ir indicada como [Winst] .
Potencia eléctrica nominal	A veces simplemente potencia. Cantidad de energía entregada por unidad de tiempo. La unidad es el Watt [W].

RAMA-L	Ratio y Análisis Medio Ambiental Lumínico. Modelo para el cálculo de flujo lumínico contaminante.
REECL	Red Española de Estudios de Contaminación Lumínica.
Repercusión medioambiental	Efecto de la afectación medioambiental sobre el medio ambiente y sus sistemas de vida. Suele valorarse mediante la variación de poblaciones de especies, efectos sobre sus procesos de vida, etc.
SQM	Sky Quality Meter. Dispositivo de medida de fondo de cielo. Desarrollado por la marca Unihedron.
Starlight, Fundación	Fundación con personalidad jurídica propia y creada por el Instituto Astrofísico de Canarias. Su principal objetivo es la difusión de la astronomía y la promoción del movimiento Starlight, en pro de la protección de los cielos limpios de contaminación lumínica.
ULOR	En inglés, Upward Lighting Output Ratio. Es la fracción de luz de una luminaria que se emite hacia el hemisferio superior respecto al total que sale de una lámpara. En castellano es análogo al F.H.S.
ULR	En inglés, Upward Lighting Ratio. Es la fracción de luz de una luminaria que se emite hacia el hemisferio superior respecto al total que sale de una luminaria. En castellano es análogo al F.H.S.i.
UUF	En inglés, Urbanised Upward Flux. Flujo lumínico total que escapa de una ciudad hacia el cielo.
VSAP	Vapor de Sodio a Alta Presión. Tipología de lámpara.
VSBP	Vapor de Sodio a Baja Presión. Tipología de lámpara.
VIIRS	En inglés, Visible Infrared Imaging Radiometer Suite. Es un sensor diseñado por Raytheon y que está a bordo del satélite meteorológico Suomi-NPP. Toma imágenes continuamente de la superficie terrestre.
VM	Vapor de Mercurio. Tipología de lámpara.

1. INTRODUCCIÓN.

*Si nos perfeccionamos en una sola
cosa y la comprendemos bien,
adquirimos por añadidura la
comprensión y el conocimiento de
muchas otras cosas.*

Vincent Van Gogh

1.INTRODUCCIÓN:

1.1. Definición del problema de investigación.

El planeta Tierra se formó hace más de 4.500 millones de años (Halliday 2001). Durante los años que continuaron, se sucedieron diferentes etapas, algunas en situaciones singulares: Por ejemplo hace 850 millones de años, se cree que se inició el denominado periodo Criogénico, cuando la tierra estuvo totalmente congelada (Hoffman, Kaufman et al. 1998). Al inicio del Paleozoico, en el Periodo Cámbrico (hace más de 500 millones de años), se desarrollaron las primeras formas de vida complejas, adaptándose a las condiciones del planeta. Si nos centramos en lo que hace referencia a su relación con el Sol y el movimiento de rotación de la Tierra, fue entonces cuando se estabilizó y actualmente es de 23 horas con 56 minutos y 4 segundos. La inmensa mayoría de formas de vida se adaptaron a esta alternancia entre luz y oscuridad para el desarrollo de sus actividades (fotosíntesis, hábitos de alimentación, etc.). Y así ha sido hasta también ahora.

El periodo Cuaternario, se define como aquel en el que surgieron grandes mamíferos, y aparecen los primeros homínidos; la última y actual época del periodo es el Holoceno, donde acaba la última gran glaciación y surge la civilización humana (Grandstein, James et al. 2004). El ser humano, se ha desarrollado como cualquier otro animal, en particular como cualquier mamífero: Su adaptación noche-día, y su actividad lo ubicó como un animal de comportamiento diurno, y descanso nocturno. Realizaba la mayoría de la actividad de caza y recolección durante el día, y durante la noche se dedica a cocinar, reposar y otras labores auxiliares.

Incluso durante los primeros asentamientos en poblados, en la cultura urbana romana, o durante el Renacimiento, la vida era principalmente diurna, dejando las actividades nocturnas a aquellas más relajadas y sosegadas



Figura 1.1 Cuadro "Young man Reading by candlelight". De Matthias Stom (Wikipedia 2015)

Todo cambia de forma drástica a mediados del siglo XVII, con la Revolución Industrial. La optimización de los procesos, y la intensificación de la producción, creó unas necesidades en mecanización de maquinaria, concentración masiva de población en ciudades (éxodo del entorno rural), y mejora de los sistemas de transporte y concentración de capitales para conseguir disponer de los recintos fabriles (Iñigo Fernandez 2012). Esta concentración de capital, y necesidades de inversión, originaron que la clase burguesa, necesitara acortar al máximo los periodos de retorno de la inversión, y para ello se comenzó a producir en las 24 horas del día.

Todo este proceso generó una modificación de las condiciones, en el entorno del ser humano y del ecosistema en general:

- Modificación de cursos fluviales.
- Necesidad de espacio para uso productivo intensivo.
- Generación de residuos en zonas pequeñas, con una alta concentración de habitantes.
- Creación de bancos, circulación generalizada de moneda.
- Desigualdades sociales.
- Etc.

Y en lo que concierne a esta tesis:

- Cambio del comportamiento del ser humano, modificando su actividad diurna, a también nocturna, variando el ciclo natural de actividad y descanso.

Para poder desarrollar estas actividades, era necesaria una serie de infraestructuras de servicio, como proporcionar luz a las zonas donde eran requeridas. Se iluminaron las fábricas y las infraestructuras (vías, calles...), para poder realizar esta actividad en momentos en los que la luz natural no estaba, o en lugares donde no llegaba.

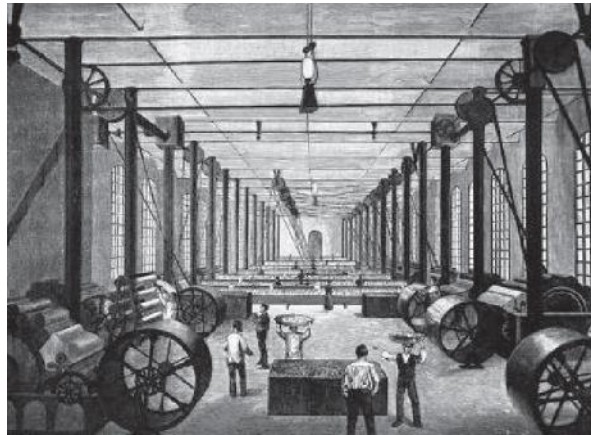


Figura 1.2 y 1.3 Iluminación de una fábrica (Kalipedia 2012) y cosecha con luz de arco eléctrico en 1882 (Carolyn 2015).

Esta tendencia se ve reflejada por ejemplo en las necesidades energéticas del ser humano según en la época en que vivió:

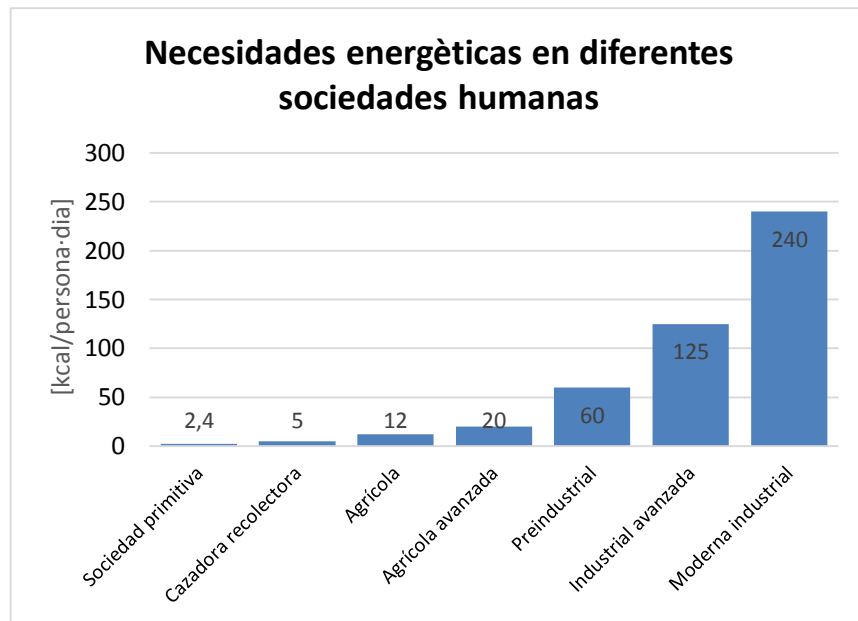


Figura 1.4 Consumo de energía en las ciudades y evolución, miles. Elaboración propia a partir de fuente original: (Tyler Miller 1996).

Sin embargo, como toda actividad antropomórfica, ésta genera un impacto en su entorno. Se conoce como impacto ambiental:

“La alteración que introduce una actividad humana en su entorno; este último concepto identifica la parte del medio ambiente afectada por la actividad, o más ampliamente, que interacciona con ella. Por lo tanto el impacto ambiental se origina en una acción humana y se manifiesta según tres facetas sucesivas:

- *Modificación de alguno de los factores ambientales o del conjunto del sistema ambiental*
- *La modificación del valor del factor alterado o del conjunto del sistema ambiental*
- *La interpretación o significado ambiental de dichas modificaciones, y en último término, para la salud y bienestar humano. Esta tercera faceta está íntimamente relacionada con la anterior ya que el significado ambiental de la modificación del valor no puede desligarse del significado ambiental del valor que parte.”* (Gómez Orea 2003)

Se debe tener en cuenta que:

“La alteración se mide por la diferencia entre la evolución en el tiempo que tendría el entorno, o alguno de los factores que lo constituyen, en ausencia de la actividad causante y la que tiene en presencia de ésta” (Gómez Orea 2003)

En el caso que atañe a esta investigación, se va a estudiar el impacto ambiental de la luz en instalaciones de alumbrado exterior, nocturno. Siempre teniendo en cuenta que la función del

alumbrado es la de proporcionar el servicio lumínico para que el observador pueda desarrollar cierta actividad en garantías de calidad, seguridad, y con un rendimiento y satisfacción adecuados.

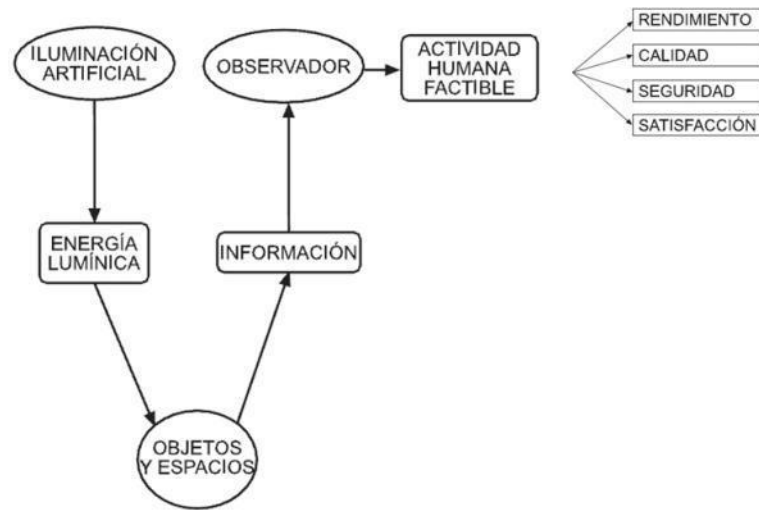


Figura 1.5 Diagrama básico de las funciones en el servicio de alumbrado (García Gil, San Martín Páramo et al. 2012)

Esta actividad tiene una serie necesidades de recursos y generación de residuos que pueden impactar en el entorno:

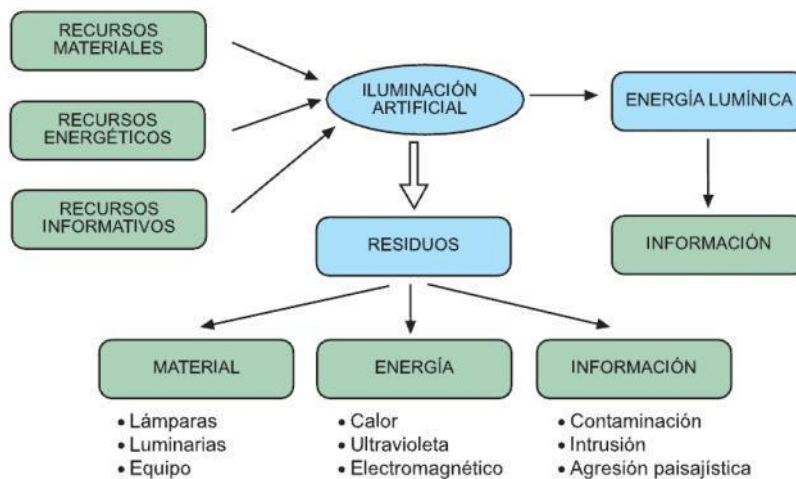


Figura 1.6 Repercusiones medioambientales en el alumbrado (San Martín Páramo 2007, García Gil, San Martín Páramo et al. 2012)

En toda actividad donde se cree un producto relacionado con la actividad de los sentidos, se puede crear un residuo paralelo. En todo ello las administraciones ya han tomado acciones para su control y minimización (GENCAT 2015, JUNTA-Andalucía 2015). En el caso de la iluminación y por la idiosincrasia del servicio, es el residuo informativo. (San Martín Páramo 2011).

La contaminación lumínica tiene dos afectaciones principales (Narisada and Schreuder 2004):

-
- Resplandor luminoso: Como el incremento del brillo natural nocturno de la cúpula celeste nocturna.
 - Intrusión lumínica: Introducción de luz en un entorno que debería estar oscuro para desarrollar las actividades que allí tienen lugar de forma natural.



Figura 1.7 y 1.8 .Resplandor luminoso del Área Metropolitana de Barcelona (Garcia 2010) y zorro deslumbrado por la luz de nuestro vehículo (Garcia Gil and Estrada Garcia 2014)

En ocasiones, el buen diseño de las instalaciones de alumbrado puede minimizar las repercusiones medioambientales. Incluso reducirlas a casi insignificantes. Pero en todo caso, la actividad humana introduce un elemento que altera el entorno:



Figura 1.9 Esquema de cómo afecta la contaminación lumínica de diferentes tipos de luminarias (Nixon 2015)

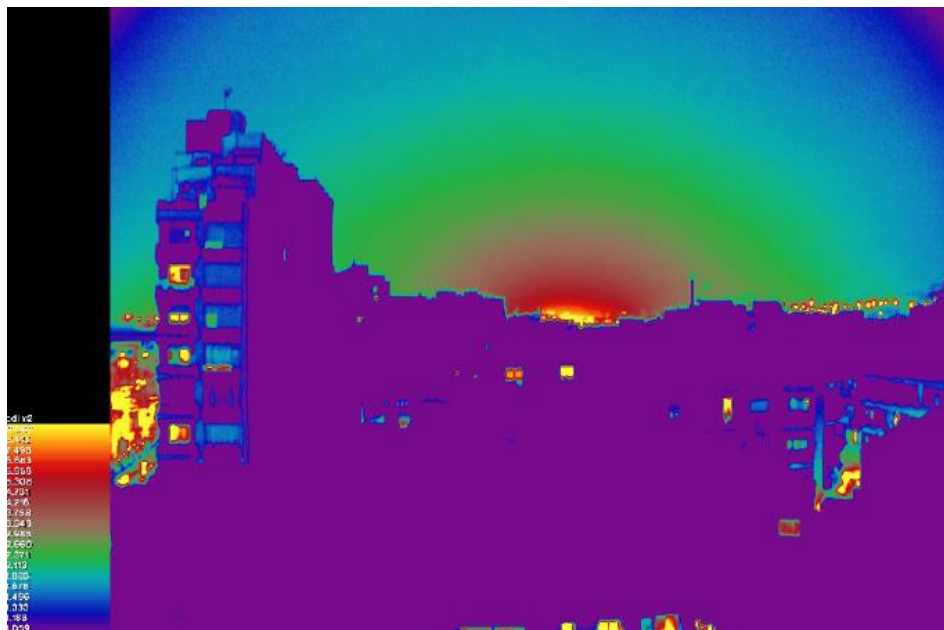


Figura 1.10 Incremento del brillo luminoso debido al encendido de un campo deportivo diseñado según todas las recomendaciones oficiales (García Gil 2012)

En la figura 1.9 vemos que siempre que hay la instalación encendida, hay resplandor luminoso, o flujo lumínico intruso en el medio circundante. Sólo se evita la alteración del medio cuando la luz está apagada. En la figura 1.10 se muestra la imagen de un campo deportivo diseñado según todas las recomendaciones. A pesar de ello, altera el entorno, creando resplandor luminoso.

Resumiendo: la Contaminación Lumínica (en adelante CL) es un residuo informativo, subproducto de una actividad humana: El alumbrado artificial nocturno en, o hacia el exterior.

Esta actividad crea un impacto en el entorno y tanto su fuente como sus repercusiones, son el problema a considerar en la investigación.

1.2. Justificación del problema objeto de investigación.

El proyecto de alumbrado tiene como objetivo proporcionar las instalaciones necesarias para garantizar el servicio lumínico. La metodología de diseño y cálculo han sido prácticamente los mismos en décadas; sólo viéndose modificados por la inclusión de programas de cálculo, reglamentación nueva, etc. (MINISTERIO-DE-INDUSTRIA 2008, DIAL 2015, PhilipsLighting 2015, Relux 2015). Pese a existir métodos de optimización en la elaboración de este tipo de proyectos, y con resultados muy prometedores (Gómez-Lorente, Rabaza et al. 2013, Gómez-Lorente, Rabaza et al. 2013), en general no se han utilizado de forma extensiva.

En la actualidad la facilidad para poder proporcionar un elevado nivel lumínico, así como la extensión de las instalaciones de alumbrado han generado un rápido auge y gran desarrollo de las fuentes de luz. La inclusión del LED ha revolucionado la industria y las posibilidades de instalaciones de instalaciones de alumbrado.

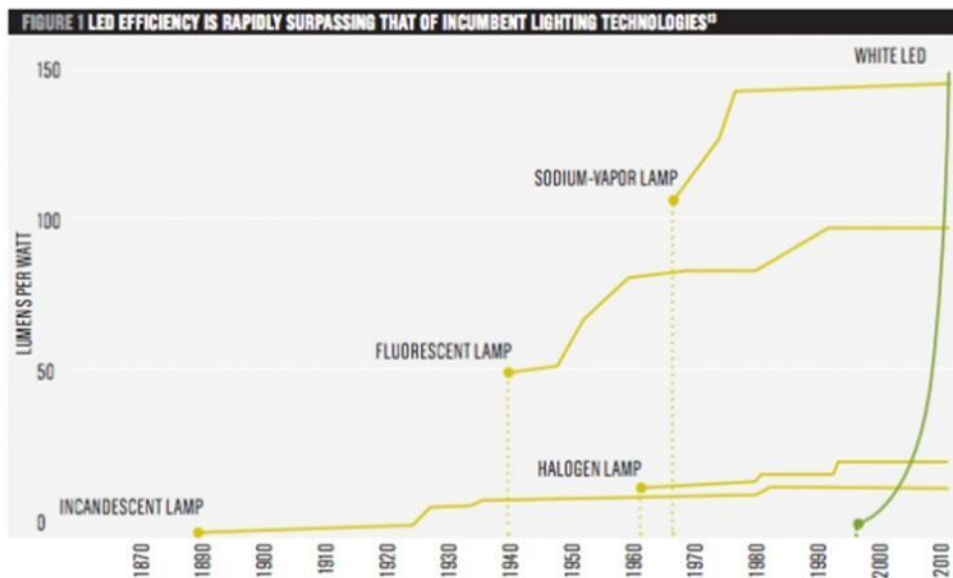


Figura 1.11 Evolución esperada de la eficacia de las fuentes de luz (García Gil 2013)

La UNESCO ha designado al año 2015 Año Internacional de la LUZ (UNESCO 2015) y el premio Nobel de Física de 2014 fue para el japonés Shuji Nakamura, por el descubrimiento del LED azul, necesario para crear luz blanca a través de este tipo de fuente de radiación (ELPAIS 2014).

Sin embargo, hay organizaciones que avisan del impacto del incremento de la iluminación indiscriminada, y sin conocer sus consecuencias. Algunas muestras se pueden observar en la *Declaración sobre el uso de la luz blanca rica en componente azul para el alumbrado nocturno*

(Sky 2014); la advertencia sobre la CL y el Año Internacional de la Luz por parte de diversos ámbitos científicos (Walker 2015); y las aclaraciones sobre las declaraciones del premio Nobel 2014 de Física por Darsky Association (DARKSKY 2014).

El estudio de sus repercusiones es incipiente, y no hay una metodología, ni una forma reglada de cómo poder proceder a realizar una Evaluación de Impacto Ambiental. Algunas administraciones indican un índice de contenidos para garantizar el cumplimiento de la ley vigente, como propone el *Projecte de Decret de desenvolupament de la Llei 6/2001* en su Anexo 1 (GENCAT 2014), o algunas guías básicas generales o recomendaciones (Falchi 2011, García Gil 2012)

Sin embargo, el incremento de las instalaciones de alumbrado, su extensión y su potencia instalada, generan un aumento en la problemática. Incremento que supone un impacto de la luz como residuo informativo.

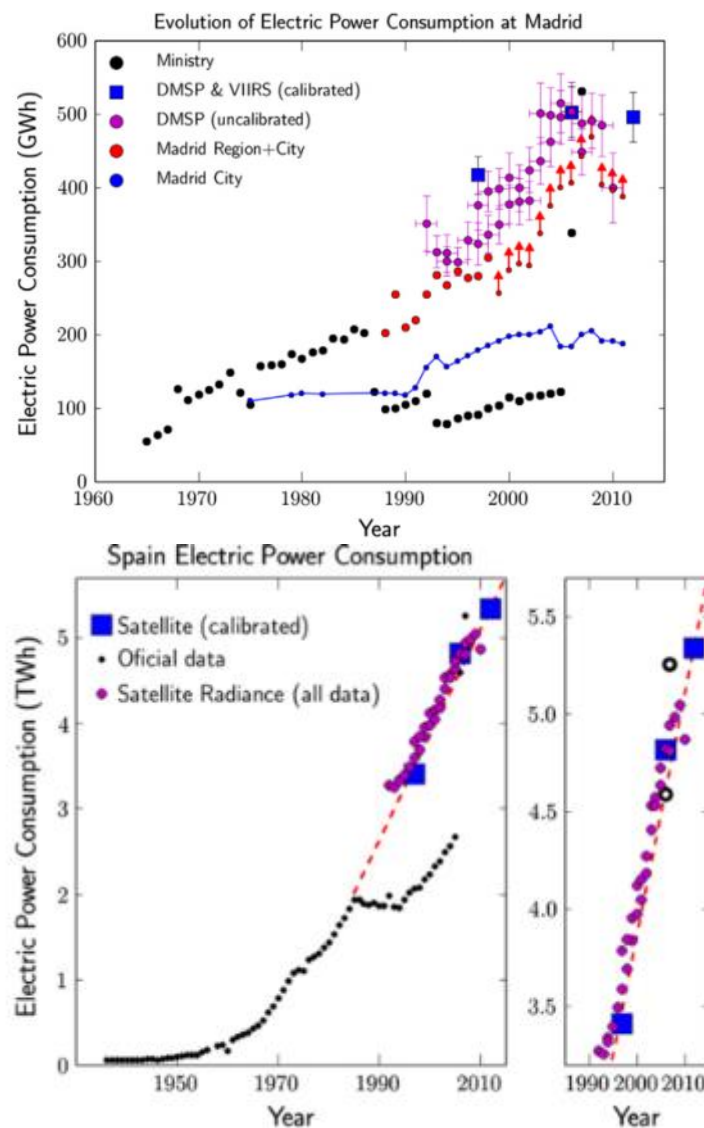


Figura 1.12 y 1.13 .Evolución de consumo energético en Madrid según diferentes fuentes y en general de España(Sánchez de Miguel, Zamorano et al. 2014)

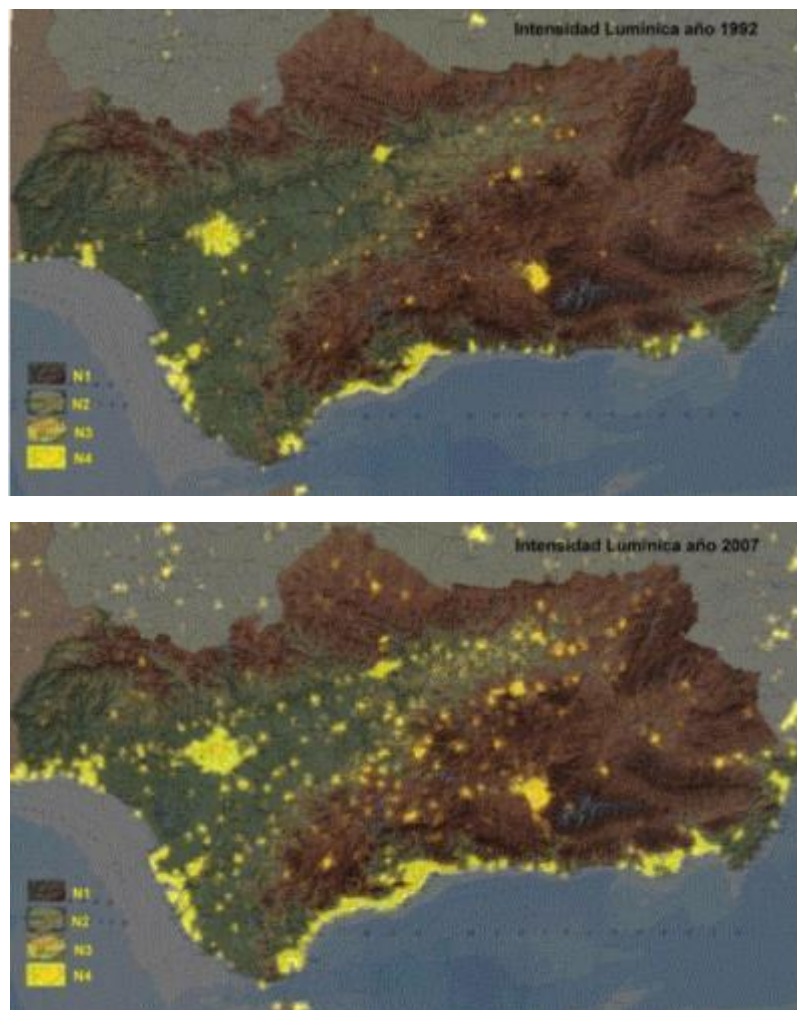


Figura 1.14 . Aumento del brillo detectado por satélite en Andalucía desde el año 1992 al año 2007 (JUNTA-Andalucía 2015)

En los aspectos medio ambientales ya no es suficiente hablar de los recursos necesarios, el impacto de la generación de energía y la evaluación del impacto mediante la huella de carbono (Bará 2013). La CL en sus diferentes repercusiones y problemáticas, puede afectar a todo el entorno (ecosistema, salud humana, etc.), de forma que existe pues, la necesidad de conocer otros aspectos no solo energéticos o funcionales de las instalaciones de alumbrado. Incluso para la población en general, la reforma de instalaciones supone un posible punto de discordancia (Trueba 2015).

Debido al conocimiento relativamente reciente de los efectos de la CL, al rápido auge en la instalación sistemas de alumbrado, y a la dificultad de las administraciones por poder evaluar sus repercusiones, se justifica el desarrollo de la tesis. Ésta, permite ayudar a suplir el vacío de la predicción del impacto de la CL.

1.3. Preguntas de investigación.

Así, debido a las necesidades analizadas, y la motivación de la investigación, nos surgen las siguientes preguntas:

¿Es posible conocer la magnitud de la fuente de la contaminante lumínica de una instalación de alumbrado?

¿Es posible determinar el impacto ambiental de la radiación luminosa proveniente de las instalaciones de alumbrado en un entorno determinado?

¿Es posible crear una estructura metodológica que permita unir la magnitud de la fuente contaminante y sus efectos en el entorno?

¿Se podría utilizar esta metodología como herramienta para la predicción del impacto ambiental en proyectos de alumbrado y usarlos con el objetivo de minimizar las repercusiones medio ambientales de la radiación visible provenientes de los sistemas de alumbrado?

1.4. Hipótesis.

De las preguntas anteriores se formula la siguiente hipótesis de investigación:

Es posible implementar una metodología para la predicción del impacto ambiental de la radiación lumínica proveniente de las fuentes de alumbrado nocturno, y que sirva de herramienta para minimizar sus repercusiones en la redacción de proyectos de ingeniería.

1.5. Objetivos.

El objetivo principal de esta tesis doctoral es la de proponer una metodología para la predicción del impacto ambiental de la contaminación lumínica, de forma que permita evaluar su afectación y sus repercusiones en consonancia a la magnitud del foco contaminante.

Para ello, se necesitan perseguir diversos objetivos particulares:

- Caracterizar y hallar la dimensión de los focos contaminantes.
- Recopilar la influencia de las diferentes características de los sistemas de alumbrado al entorno sensible.
- Definir la sensibilidad de los entornos objetos del impacto.
- Determinar las mejores metodologías existentes para poder implantarlas en la predicción.
- Adaptar de forma simplificada los modelos matemáticos existentes para poder utilizarlos en proyectos luminotécnicos de ingeniería.

-
- Estructurar una metodología flexible y modificable según nuevos avances científicos y que sirva para evaluar el impacto ambiental

1.6. Alcance y límites.

La presente tesis genera una propuesta de metodología que busca proporcionar las siguientes funciones:

- Generar una herramienta para ser implantada en proyectos de ingeniería de diseño de instalaciones luminotécnicas y que puedan impactar en el ecosistema natural nocturno.
- Persigue poder comprobar la inclusión de modelos científicos de forma simplificada en los proyectos de alumbrado y grandes reformas, así como en la ayudar en la generación de normativa de la CL.
- Estudiar el impacto sobre los entornos siguientes:
 - o Cúpula celeste y la observación de astros.
 - o Afectación sobre ecosistemas naturales oscuros.
 - o Sobre la fisiología de la salud humana relacionada con el descenso de melatonina.
- Se propondrán métodos de medida y evaluación para la verificación de la afectación del impacto.

La orientación de este estudio es pragmático por lo que crea una **herramienta de uso** para personal técnico que realice proyectos de alumbrado. Se nutre en gran parte del estado del arte actual, y **no genera conocimiento al respecto de nuevas repercusiones o afectaciones**, si no que se centra más en la fuente contaminante (el alumbrado) y el estudio de sus características para minimizar el impacto. Es por ello que queda fuera del alcance del trabajo de investigación:

- Generar nuevo material sobre las repercusiones fisiológicas, sobre salud, ecosistema o nuevos modelos de brillo de cielo.
- Diseñar nuevos procedimientos de medida de las afectaciones.
- La emisión de Gases de Efecto Invernadero, costes económicos, residuos materiales o cualquier otro tipo de impacto.

Se entenderá por energía lumínica aquella radiación que responsa a la curva de sensibilidad de las células sensibles a la radiación lumínica que hay en la retina del ser humano: Conos, batones e IpRGCs. Para el estudio de las afectaciones a otros seres vivos se realizarán paralelismos en función del estado del arte de la investigación en cada caso.

1.7. Resumen de la metodología utilizada.

La tesis se desarrolla en 4 fases principales:

- **Recopilación documental** y conocimiento del estado del arte: Ha requerido un análisis exhaustivo de la bibliografía desarrollada sobre la problemática. En esta, se ha estudiado especialmente en lo que hace referencia a repercusiones medioambientales, y modelización del problema.
- **Estudio de los modelos de cuantificación de CL:** Se ha procedido a evaluar los modelos escogidos como válidos para implantar en proyectos de ingeniería, y se ha particularizado su uso para poder usarlos en casos generales. Es decir, se ha buscado la simplificación de modelos matemáticos complejos, para poder usarlos por personal técnico, no científico. Normalmente los responsables de realización de proyectos luminotécnicos, técnicos municipales, redactores de reglamentación, etc.
- **Trabajo de campo:** Se ha diseñado una metodología para realizar un trabajo de campo que ha tenido como objetivo garantizar la posibilidad de medir las afectaciones ambientales, así como la factibilidad de realizar las medidas. Se han levantado gráficos, planos y conclusiones finales al respecto.
- **Propuesta de metodología de predicción del impacto ambiental:** Donde se materializa una metodología estructurada para ser utilizada de forma flexible en diferentes situaciones. En esta metodología se proponen diferentes escenarios, sensibilidad del entorno y propuestas de evaluación en función de la complejidad del caso, fragilidad del ecosistema, magnitud de la fuente contaminante, etc.

1.8. Estructura del documento de tesis.

El documento se ha estructurado para dar respuesta a la hipótesis de partida y según la metodología expuesta. Para ello se ha separado en los siguientes capítulos:

- **Capítulo 1. Introducción:** Es el presente apartado y contiene los objetivos de la investigación, antecedentes y estructura del documento.
- **Capítulo 2. Estado del arte:** Recoge la situación actual de la investigación de la problemática. Tiene 3 partes diferenciadas: Las afectaciones a los ecosistemas, la caracterización de las fuentes contaminantes y la situación de la CL en los proyectos (como se aborda la problemática). En este capítulo todo y citar a numerosos autores y datos sobre de las afectaciones y repercusiones, se busca como objetivo marcar el contexto para ser desarrollado posteriormente.
- **Capítulo 3. Cuantificación del a CL:** Donde se presentan las investigaciones y modelos más avanzados para cuantificar las afectaciones, repercusiones y el foco contaminante. El objetivo de este capítulo más concreto, es definir los modelos que van a utilizarse posteriormente para desarrollar la metodología final.

A partir de este apartado se desarrolla el trabajo experimental. Este trabajo se divide en:

- **Capítulo 4. Metodología de trabajo de campo:** Se detallan las zonas de estudio y medida, así como los aparatos utilizados y los objetivos que se buscan con el trabajo de campo.
- **Capítulo 5. Trabajo de campo:** Se expone el trabajo de campo realizado:
 - o Campañas de medidas de fondo de cielo.
 - o Estudios de instalaciones en zonas naturales.
 - o Cálculos luminotécnicos y predicciones de la afectación medio ambiental
 - o Cálculo del foco contaminante.
 - o Evaluación de resultados obtenidos.

Por último, y como resultado del trabajo realizado, se propone en el capítulo 6.

- **Capítulo 6. Propuesta de metodología de predicción de impacto ambiental:** Donde se plasma la propuesta del modelo, según los parámetros de tipologías de entornos y proyecto.
- **Capítulo 7. Conclusiones:** Capítulo a modo de clausura, donde se reflejan las conclusiones más importantes y las posibles líneas futuras de investigación.

2. ESTADO DEL ARTE Y LA TÉCNICA.

*The land ethic simply enlarges
the boundaries of the
community to include soils,
water, plants, and animals or
collectively: the land.*

(A Sand County Almanac)

Aldo Leopold

2. ESTADO DEL ARTE Y LA TÉCNICA:

2.1 Contaminación Lumínica (CL).

2.1.1 Definición de la problemática.

El estudio y conocimiento de la Contaminación Lumínica (CL), es relativamente reciente. Empezó de forma consistente en los años 70, cuando los astrónomos empezaron a preocuparse por el brillo luminoso que surgía de las ciudades. Algunos de los pioneros y primeros investigadores de la problemática fueron M.F. Walker y la Real Sociedad Astronómica de Canadá. Ya con ellos se planteaba de la problemática de las ciudades y su iluminación, así como de la dificultad de ubicar observatorios astronómicos cerca de estas aglomeraciones (Walker 1976, Walker 1977).

En los años 80, diferentes estudios de R.H. Garstang aportaron otra visión, enfocando la mirada en las ciudades, mejorando fórmulas anteriores, y determinando la cantidad de CL que producían las concentraciones urbanas (Garstang 1986). Y ya posteriormente con los conocidos trabajos de otros investigadores, a modo de ejemplo:

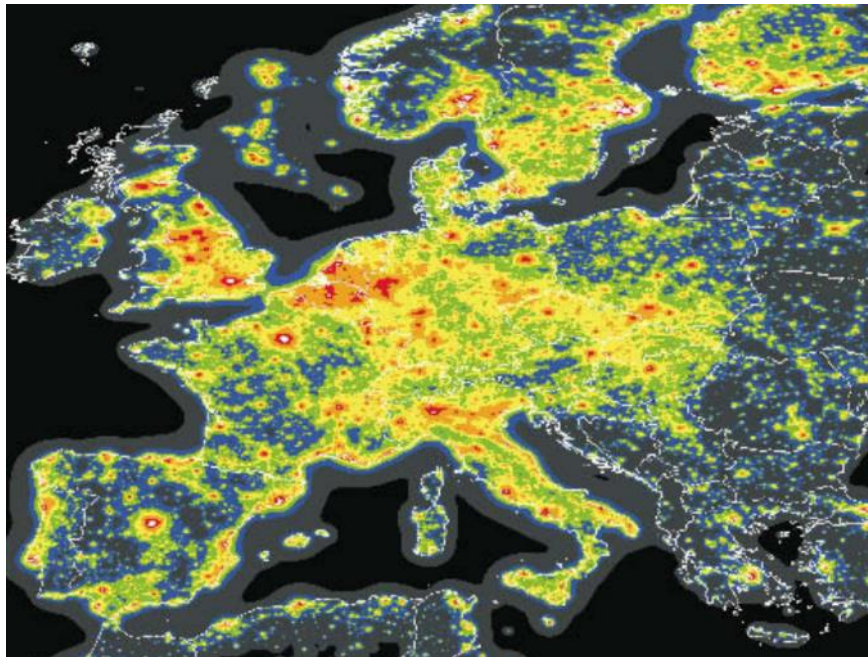


Figura 2.1. Ilustración de "The first World Atlas of the artificial night sky brightness" (Cinzano, Falchi et al. 2001)

El conocimiento de las repercusiones se ha hecho más exhaustivo y han entrado otros usuarios o implicados en la CL: ecologistas y médicos:

Hace años que los ecologistas han estado estudiando las implicaciones de la luz o la energía radiada de fuentes luminosas. Comenzaron a evaluar los efectos de la CL sobre los ecosistemas en la década de los 90 y de forma integrada ya casi entrado el año 2000.

La publicación global que sirve de referencia es *Ecological Light Pollution* (Longcore 2004) o *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting* (Rich and Longcore 2006) del mismo equipo de investigadores. Ante este desarrollo, en 2007 se comenzó a dar difusión a la Escotobiología (Bidwell, Goering et al. 2007). Esta se conoce como la biología de la noche y cubre muchas áreas de investigación: Animales, insectos, aves, plantas, salud humana, sociología... Persigue el reconocimiento y la necesidad de considerar la oscuridad de la noche, como un elemento más en los ecosistemas.

En lo que hace referencia a la fisiología y afectaciones de salud al ser humano, hay estudios desde los años 80 y 90, que detectan la variación del ritmo hormonal del ser humano durante el día, y en función de la luz incidente de cada periodo (McLntyre, Norman et al. 1989). Pero en el año 2001, se origina un punto de inflexión: el descubrimiento de una nueva célula en la retina del ojo, que es sensible a la radiación luminosa y que interviene muy poco al proceso de visión: células ganglionares fotorreceptoras o ipRGCs (Brainard. 2001, Thapan, Arendt et al. 2001). Desde esa fecha y de forma intensiva, se está estudiando la sensibilidad, rangos de acción y consecuencias de la variación de los regímenes lumínicos durante el día en la salud humana.

De forma que, según la afectación, entorno afectado y usuario implicado, podemos diferenciar en 3 diferentes efectos de la CL (García Gil 2012):

- Incremento de los niveles lumínicos en ecosistemas naturales nocturnos
- Incremento de niveles lumínicos en hábitats de descanso humanos.
- Resplandor luminoso de la cúpula celeste:

Ante este incremento de conocimientos científicos, su definición ha quedado desfasada rápidamente. A modo ilustrativo, si hacemos un repaso de las utilizadas:

Real Academia Española la *contaminar* se puede definir como:

"Alteración nocivamente la pureza o las condiciones normales de una cosa o un medio por agentes químicos o físicos" (RAE 2015)

El adjetivo (*lumínica* en este caso) queda sin usarse, y por lo tanto no es suficiente para particularizar el objeto de estudio. Así es necesario recurrir a referencias técnicas:

"The contamination of air, water, or soil by substances that are harmful to living organisms. Pollution can occur naturally, for example through volcanic eruptions, or as the result of human activities, such as the spilling of oil or disposal of industrial waste. Light from cities and towns at night that interferes with astronomical observations is known as light pollution. It can also disturb natural rhythms of growth in plants and other organisms. Continuous noise that is loud enough to be annoying or physically harmful

is known as noise pollution. Heat from hot water that is discharged from a factory into a river or lake, where it can kill or endanger aquatic life, is known as thermal pollution” (EPA 2014)

De forma que ya existe la consideración como tal. Si se consultan fuentes luminotécnicas:

“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 atmósfera, procedente, entre otros orígenes, de las instalaciones de alumbrado exterior, bien por emisión directa hacia el cielo o reflejada por las superficies iluminadas”.

Fuente: R.D. 1890/2008 . Reglamento de Eficiencia Energética en Instalaciones de Alumbrado Exterior. (MINISTERIO-DE-INDUSTRIA 2008)

En esta definición sólo se tiene en cuenta la afectación al cielo nocturno.

“... la emisión de flujo lumínico de las fuentes artificiales nocturnas en intensidades, direcciones o rangos espectrales innecesarias para la realización de las actividades previstas en la zona que se han instalado las luces”

Fuente: Ley 6/2001. Protección del Medio Nocturno (Generalitat de Catalunya).(GENCAT 2001)

Según esta última definición, si tenemos una instalación como un campo deportivo, perfectamente iluminado: Con proyectores de halogenuros metálicos elevada potencia, apantallados y con F.H.S.i.=0%; con niveles lumínicos adecuados para la retransmisión deportiva (por ejemplo 1500 lx); no generaría CL. Pero como se ha visto en la Figura 1.10 eso no es correcto. Esta definición parte del concepto que la CL es sólo el producto de una mala praxis. Afirmación errónea según las consideraciones medioambientales tradicionales de lo que es la contaminación y el impacto ambiental.

Una definición con consideración medioambiental (y no sólo funcional y de instalación) de lo que es la CL es:

“Light pollution is any adverse effect of artificial light, including sky glow, glare, light trespass, light clutter, decreased visibility at night, and energy waste. Light pollution wastes energy, affects astronomers and scientists, disrupts global wildlife and ecological balance, and has been linked to negative consequences in human health.”

Fuente: <http://www.darksky.org> (DARKSKY 2015)

Donde se considera que la CL es la representación de los efectos adversos producidos por el alumbrado artificial nocturno en el entorno. El desarrollo de la tesis parte de esta última definición de lo que es la CL.

2.1.2 Extensión de la CL.

Actualmente hay dos fuentes a nivel global que permiten determinar a nivel cualitativo y cuantitativo la repercusión y extensión de la CL:

- **Las imágenes por satélite:** Se analizan y modelizan para la determinación del brillo, su evolución y su extrapolación a otros factores como consumos totales energéticos.(Zamorano, Sanchez de Miguel et al. 2011) (Sánchez de Miguel, Zamorano et al. 2014) . Actualmente en esta metodología está utilizando el satélite Suomi NPP (NOAA 2015), y el uso de imágenes tomadas por astronautas georeferenciadas por la ciudadanía a través del proyecto Cities at Night (UCM-Darksky-group 2014).
- **Los modelos matemáticos de cálculo.** Como el mencionado *The first World Atlas of the artificial night sky brightness*. Este mapa es creado a partir de la observación por satélite y modelos informatizados que permiten predecir el resplandor luminoso del cielo en función de las variables que influyen (orografía, distancia a las fuentes contaminantes, curvatura de la Tierra, etc. (Cinzano, Falchi et al. 2001)

Las dos representaciones son parecidas, puesto que la fuente de los datos es la similar:

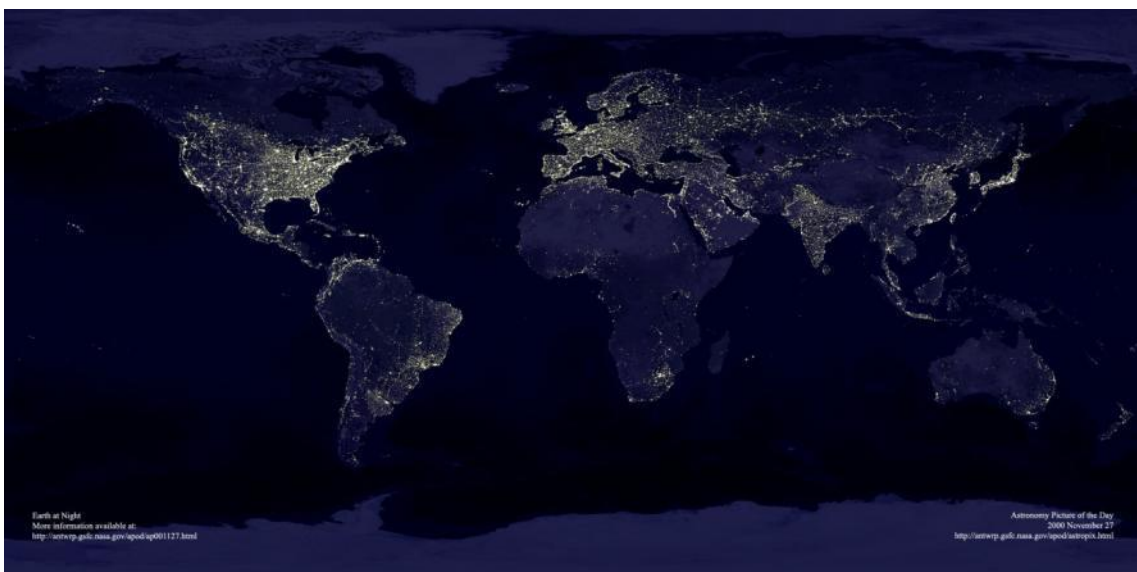


Figura 2.2 . Foto montaje de la Tierra de noche (Mayhew and Simmon 2000)

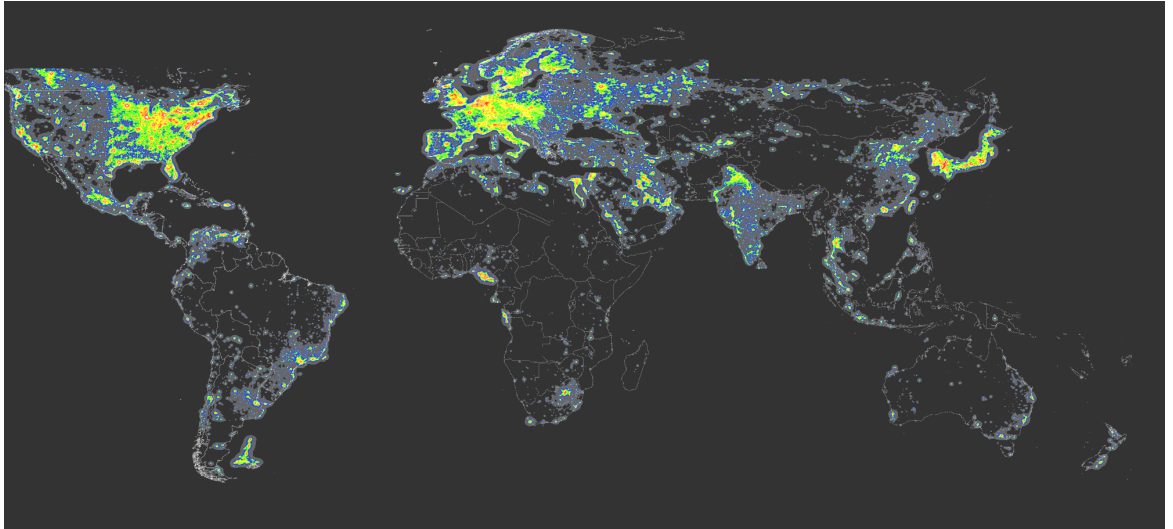


Figura 2.3 . Ilustración de toda la Tierra de "The first World Atlas of the artificial night sky brightness" (Cinzano, Falchi et al. 2001)

De su observación se puede determinar:

- El nivel general de CL muy elevado en las zonas más industrializadas con diferencia respecto a los países subdesarrollados. El contraste es claro entre países del Hemisferio Norte y el Sur, o África y Europa... Esta diferencia ha sido fuente de estudios para intentar relacionar el nivel de desarrollo de una región y el brillo captado desde el espacio, como ha publicado la Universidad de Yale (National-Science-Foundations 2011).
- En la evolución temporal se puede observar un incremento general en el brillo medido.

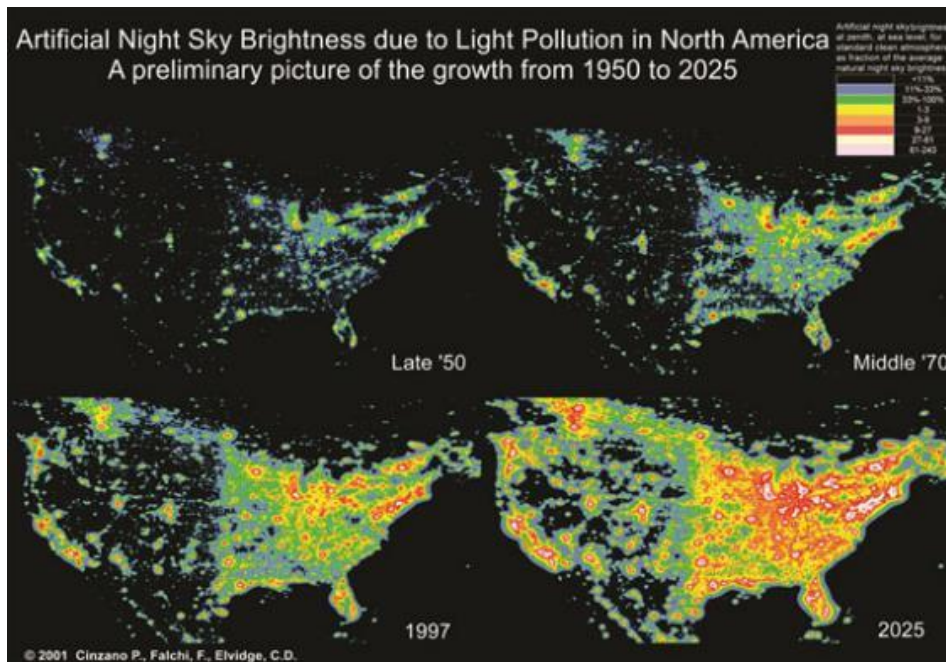


Figura 2.4. Evolución esperada según la tendencia actual para la CL en Estados Unidos, con ilustración de Cinzano a partir de (National_Park_Service_U.S. 2013)

También otros estudios han determinado que en Europa hay un incremento (excepto donde ha habido políticas de apagado por problemas económicos como en Eslovaquia). Teniendo aumentos de hasta el 30-40 % del brillo en muchos casos y en 10 años:

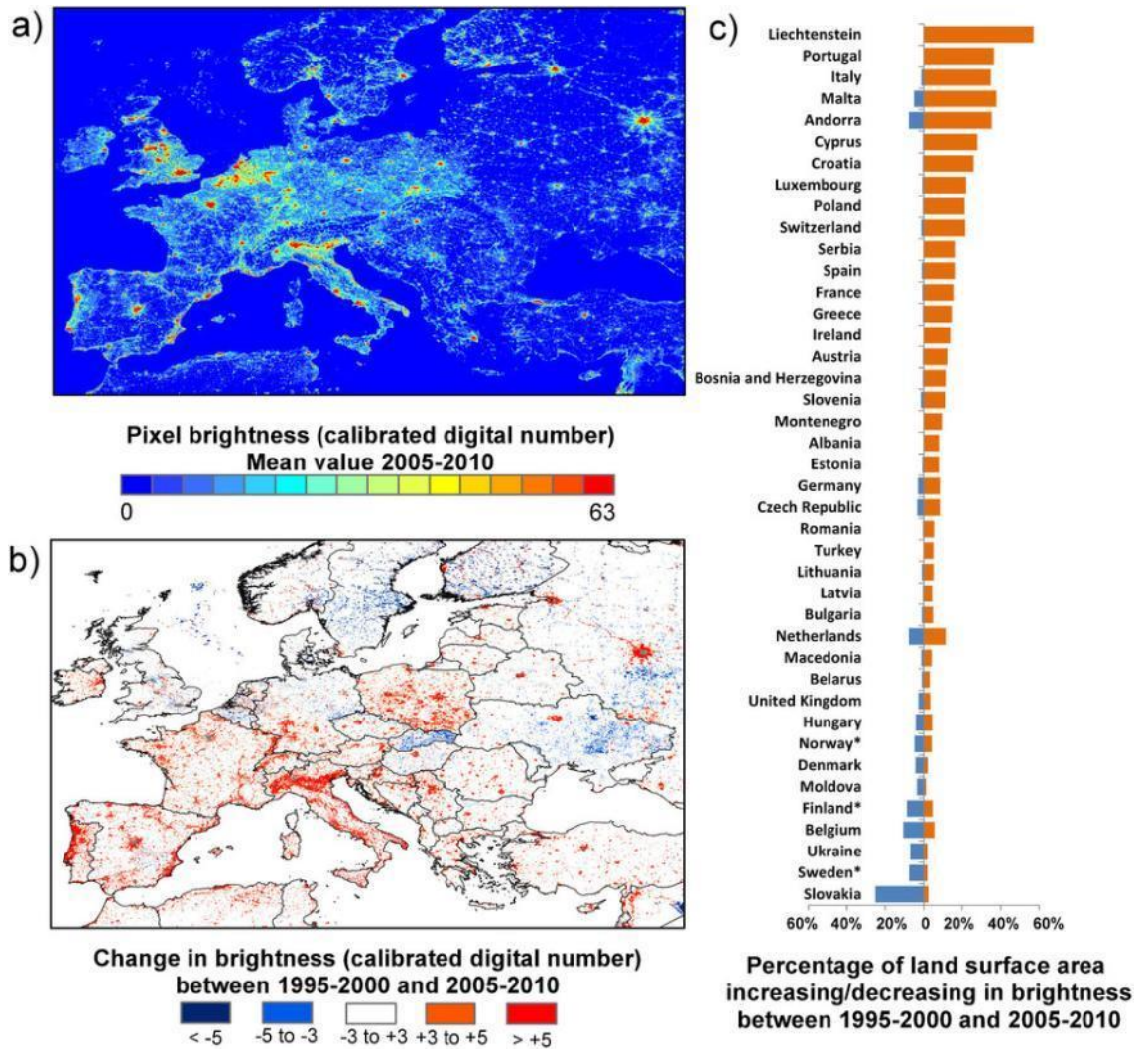


Figura 2.5 Incremento del brillo detectado en satélite en Europa entre 1995-2000 y 2005-2010 (Beníte J., Davies T.W. et al. 2014)

Así, es de esperar que la CL aumente tanto en intensidad como en distribución geográfica, convirtiéndose en un fenómeno generalizado y de consecuencias todavía inciertas por su estudio científico incipiente. La extensión de la noche puede ser a escala global, sumergiendo a la humanidad en un periodo de luna llena (Marris 2010), o de eterno y constante crepúsculo (Gallan 2014).

Bajo el antropocentrismo característico de la humanidad, incluso se han hecho estudios para detectar formas de vida extraterrestres a partir de su CL (Loeb and Turner 2012).

2.2 Afectaciones y repercusiones de la CL.

Las afectaciones vienen determinadas por el residuo informativo en forma de intrusión de energía luminosa radiada, en un lugar donde anteriormente no debería existir. Esta intrusión puede clasificarse según tres tipologías de entornos:

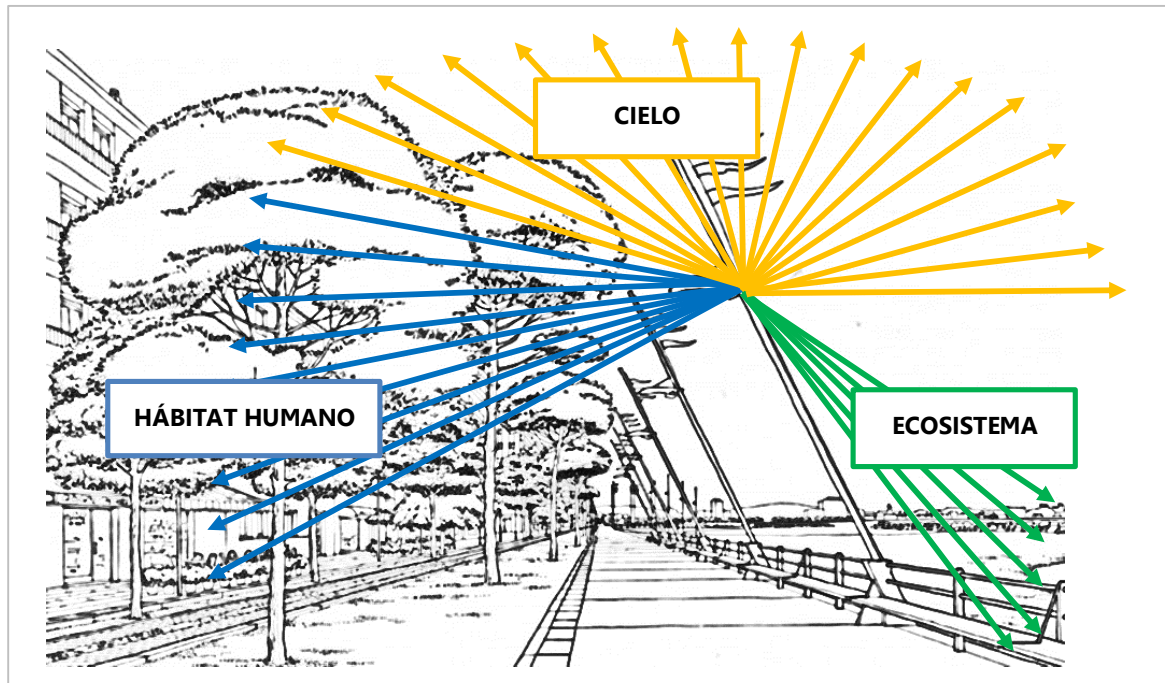


Figura 2.6 Esquemática de las afectaciones de la CL

2.2.1 Sobre el ecosistema natural.

El planeta Tierra se ha regido durante millones de años por unas características específicas, que lo hacen especial respecto a otros:

- Está a una distancia determinada del Sol (entre 147-152 millones de kilómetros), distancia que permite tener unas temperaturas ni muy cálidas ni muy frías, y variables en el ciclo de rotación.
- Está inclinado 1,5 grados respecto al plano orbital, que añadiendo el factor anterior, potencia la estacionalidad del clima, en función de su ubicación en la geografía del planeta.
- Tiene una atmósfera que nos protege de radiaciones peligrosas del Sol (UV, R-X...) y reduce la variabilidad de temperatura de la que tendría en la alternancia noche y día.
- Tiene un periodo de traslación de 365,25 días y uno de rotación de casi 24 horas

Estas características y otras similares han estado invariables durante millones de años. Los ecosistemas del planeta se han adaptado a ellas:

ADAPTACIÓN AL ECOSISTEMA NATURAL DE OSCURIDAD NATURAL:

La mayoría de especies vegetales de climas estacionales reconocen cuando van a iniciar la floración en función del aumento de horas de Sol (primavera) y saben que entrarán en hibernación cuando se acorta el día (en otoño – invierno) (Gaston, Duffy et al. 2014). Las especies han aprendido a adaptarse y a evolucionar, en los diferentes ecosistemas que existen en la Tierra; tanto en localización geográfica como en características climáticas.

En concreto y remitiéndonos al alcance del trabajo, se han adaptado a la alternancia noche y día como una necesidad vital en el desarrollo de su vida tal como la conocemos. En una simbiosis necesaria entre (Rich and Longcore 2006) (Minnaar, Boyles et al. 2014):

- Vigilia y actividad
- Descanso y trabajo
- Refrigerar y calentar
- Floración e hibernación
- Etc.

Las especies, en su evolución, han llegado a ser: diurnas, nocturnas o mixtas. A pesar de ello, merece la pena comentar que un enorme número de especies del planeta son nocturnas:

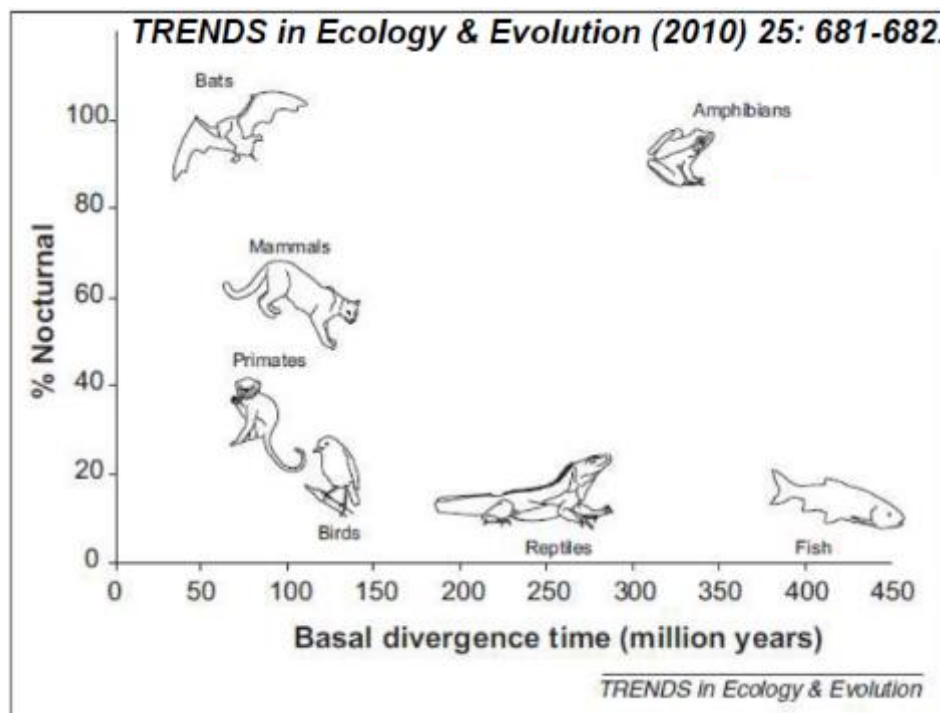


Figura 2.7 Diferentes tipologías de especies de vertebrados según su procedencia y actividad nocturna (Holker, Wolter et al. 2010)

Una enumeración de algunas especies o grupos de ellas es:

- Casi todos los marsupiales son nocturnos.
- El 3% de las aves, un 50% de las cuales son cazadoras.
- 65% de las aves migratorias hacen sus trayectos durante la noche.
- Los roedores, que son un 40% de los mamíferos, son un 90% nocturnos.
- Los murciélagos son mayoritariamente nocturnos.
- Entre la mayoría de carnívoros, también hay muchos cazadores nocturnos: Lobos, gatos salvajes, zorro, osos...
- La mayoría de especies de anfibios.
- Muchas especies de serpientes, cocodrilos lo son también.
- La mayoría de artrópodos y el 80% de las mariposas.

Estamos entonces, ante una gran cantidad de animales que han adaptado sus comportamientos, y fisiología, al terreno de actividad en situaciones de oscuridad natural.

Un pionero en estos estudios fueron T. Longcore y C. Rich con la publicación "Ecological light pollution" en el año 2004:



Figura 2.8 Imagen ilustrativa de algunas repercusiones de la CL en ecosistemas (Longcore 2004)

Estos animales necesitan condiciones naturales para mantenerse en la alternancia noche/día u oscuridad/claridad. Además, y debido a esto, los animales nocturnos y diurnos han desarrollado sistemas visuales diferentes. Normalmente los animales diurnos tienen una visión relacionada con la luz que es mayoritaria: Visión diurna o fotópica, y los nocturnos la escotópica (K. Perking, Holker et al. 2013).

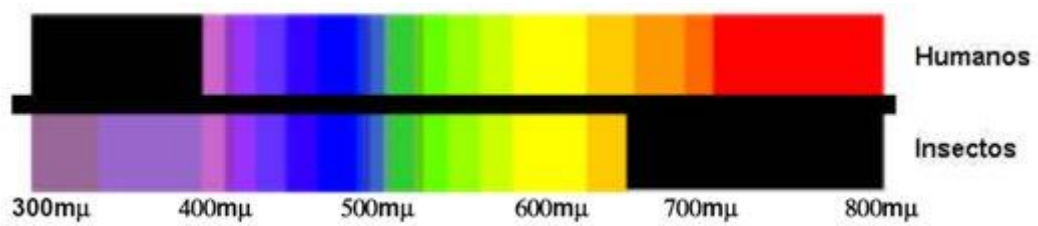


Figura 2.9 Comparación de la sensibilidad en el espectro visible de los humanos e insectos (Dolsa and Albarrán 1998)

Otros animales se mueven con sistemas de visión muy diferentes al nuestro o incluso desconocidos: Por ejemplo los murciélagos se mueven a través de señales de radio que emiten como un radar y se crean una imagen tridimensional en el espacio. Son ciegos desde el punto de vista de cómo los humanos entendemos la luz (Lacoeuilhe, Machon et al. 2014, M. Cryan 2014); las serpientes parece que tienen sistemas sensoriales de infrarrojos y hay aves con visión tetracrómica (tienen 4 tipos de conos). En general se puede decir que la visión nocturna es más sensible a los colores fríos y a zonas de franja de los azules o ultravioletas y la diurna a colores más cálidos o rojizos.

REPERCUSIONES SOBRE LOS SERES VIVOS:

¿Qué efectos puede tener la modificación de los ecosistemas naturales para los seres vivos que en ellos habitan? Como sucede con todo tipo de contaminación o variación de sus componentes o interrelaciones, pueden ser: Desde una situación claramente perjudicial, modificación de conducta que hace disminuir la posibilidad de supervivencia (para dificultar el desarrollo de sus actividades de alimentación, movilidad, reproducción, etc.), depredación, etc. (Longcore 2004). Las repercusiones directas sobre las poblaciones son las típicas de cualquier elemento nocivo para los ecosistemas: Fragmentación de las poblaciones por elementos barrera y que crean islas de colonias, disminución de las colonias que dificultan su actividad y el aumento de las necesidades energéticas, indeseables para la fase selectiva que puede favorecer a unas especies respecto a otras (Lacoeuilhe, Machon et al. 2014).

El conocimiento y estudio de la problemática es relativamente reciente. Del 22 al 24 de septiembre de 2003, se desarrolló el "Ecology of the Night" en Dorset, Ontario. A la vez, se determinó la necesidad de tomar las medidas que fueran necesarias para preservar el medio natural nocturno, además de motivar en los biólogos el estudio de la CL en frente a la biodiversidad, ya que se percibían grandes desequilibrios. Se bautizó el nombre como "Scotobiology", ciencia de estudio de los seres vivos que tienen actividad nocturna.



Figura 2.10 Imagen que da nombre a la campaña sobre Escotobiología

Existen incluso el diseño de luminarias “amigables” con la vida nocturna: con emisión lumínica reducida y espectro de emisión hacia el amarillo o rojizo (usando LED Ámbar por ejemplo), evitando así la emisión al espectro de emisión más nocivo para los seres nocturnos (en las longitudes de onda más cortas) (Dick 2013); y en general en la comunidad científica, dando guía de cómo hacer el alumbrado menos dañino al entorno (Gaston, Davies et al. 2012).

A continuación se presentan los efectos más importantes conocidos hasta ahora:

- **Efectos sobre las plantas:** El aumento de la luz en etapa nocturnas ocasiona: (Tuhárska 2014)
 - Salida prematura y pérdida tardía de hojas.
 - Modificación en la eficiencia de la fotosíntesis.
 - Extensión de los periodos de crecimiento.
 - Ineficaz polinización por la disminución de polinizadores nocturnos (las polillas son de los mayores polinizadores nocturnos que existen y son extremadamente sensibles a la luz).

A pesar de ello, las repercusiones sobre las plantas todavía son desconocidas, por la dificultad de experimentar con ellas a largo plazo. Desde el programa LoNNE (IGB 2015) se anima a la ciudadanía a colaborar para realizar estudios al respeto:

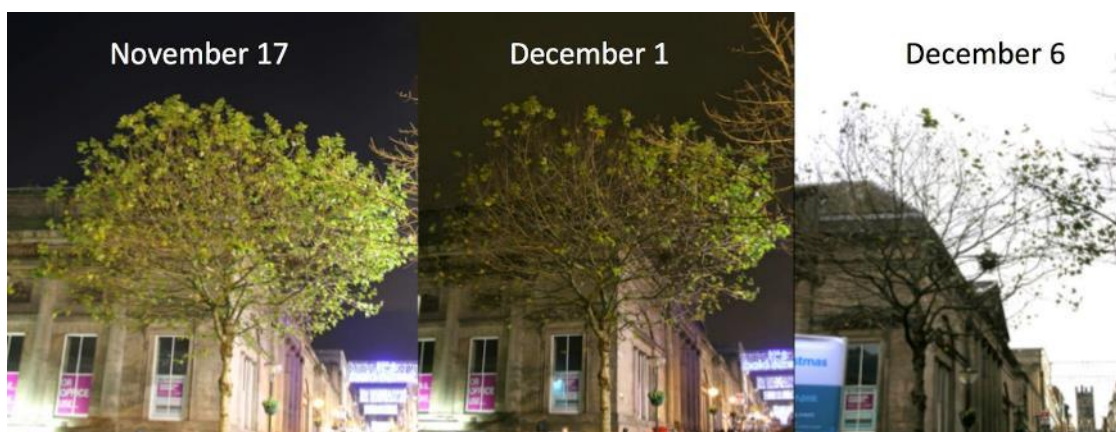


Figura 2.11 Observación ciudadana del cambio en el proceso de pérdida de hojas de un árbol (Kyba 2014)

- **Efectos sobre los insectos:** Los insectos son la fuente principal de biomasa y proteínas de los ecosistemas naturales terrestres. Son el número de especies más importante y base de la cadena trófica. Su actividad es básicamente nocturna y con la necesidad de oscuridad total. (Macgregor, Pocock et al. 2014). Así, podemos enumerar:
 - Efectos de fijación o captación: Los insectos al desplazarse se sienten cautivados por la luz o puntos brillantes. Pueden morir al impactar o por pérdida energética (cansancio). Otros simplemente se quedan inmovilizados quedándose fijados ante la luz. Hay afectación en todo tipo de luces, de vapor de sodio a alta presión también y hay estudios donde se prevé un auge importantísimo de la problemática si se introduce luz blanca (Davies, Bennie et al. 2012).

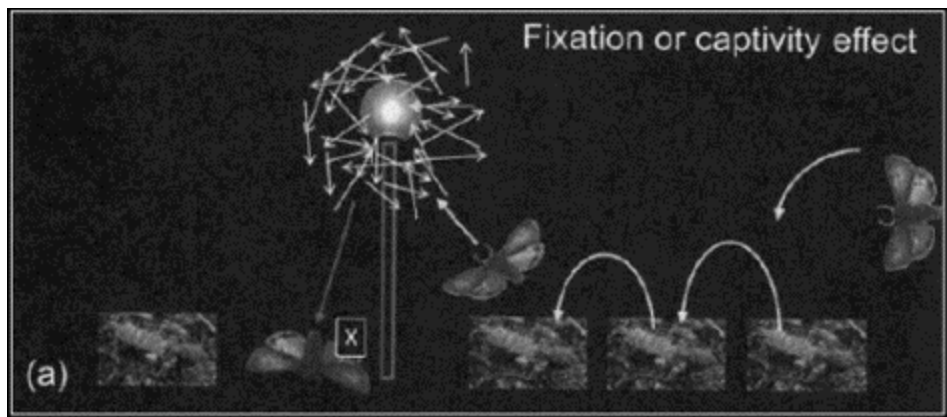


Figura 2.12 Efecto de fijación o cautividad (Rich and Longcore 2006)

- Efecto barrera: También ante los puntos brillantes, o alta luminancia, los insectos en sus movimientos de larga distancia se ven obstaculizados por la "barrera de luz" y se ven atrapados por ella como en el efecto anterior, pudiendo evitar o retardar su migración.

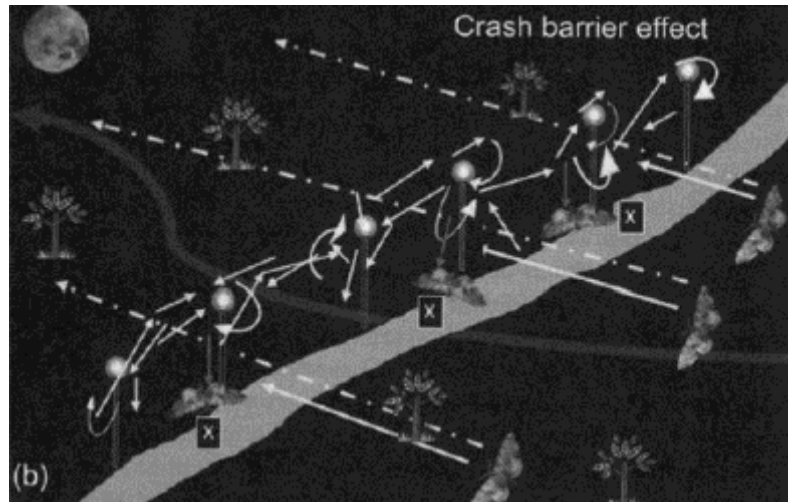


Figura 2.13 Efecto barrera (Rich and Longcore 2006)

- Pérdida de visión: Una exposición a luz intensa, puede hacer perder la capacidad visual del insecto durante un periodo de tiempo de hasta 30 minutos, por saturación de sus receptores sensoriales.
- Ovoposición: Las hembras, se pueden ver traídas por la luz y ponen sus huevos cerca de esta, no en los lugares adecuados.
- Reproducción: Depende de las especies, se puede suprimir la emisión de feromonas o dificultar la actividad de atracción durante la reproducción.
- Navegación: Las polillas utilizan la luz de la luna para orientarse y una fuente de luz de luminancia exterior, genera interferencia, provocando desorientación del animal (Froy 2003). La urbanización es una clara de las causas de la pérdida de este insecto en áreas habitadas y cercanas a ellas (Bates 2014).

Se ha documentado que el alumbrado interfiere en los mensajes reproductivos entre luciérnagas de los dos sexos. Su ciclo se ve afectado para niveles lumínicos superiores a 0,18 lx y claramente distorsionados para niveles superiores a 0,3 lx. (Bird 2014) e independientemente de si son luces blancas o de vapor de sodio a alta presión (Hagen, Machado Santos et al. 2015).

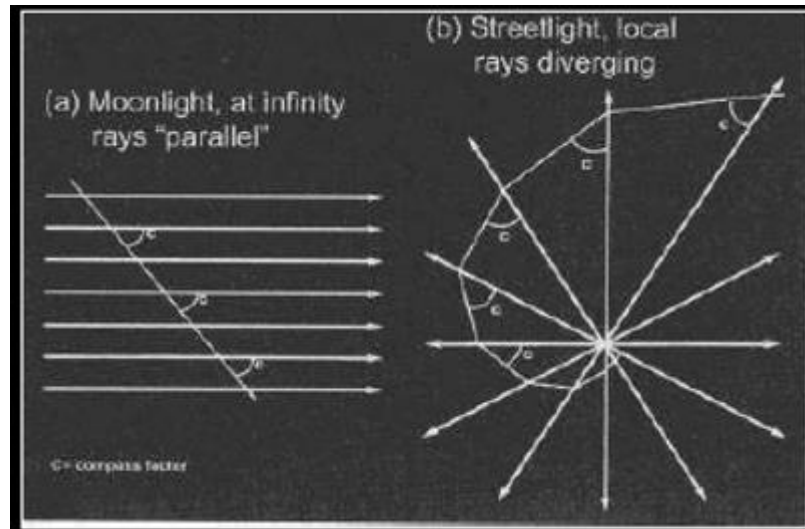


Figura 2.14 Pérdida de orientación por confusión de la ubicación de la Luna ante otro elemento brillante. (Rich and Longcore 2006)

Estos efectos dependen de diferentes factores: Las luminarias en altura tienen efectos más importantes cuando hay Luna nueva y puede ver ser un efecto contaminante en un radio de 400 metros.

Quizás uno de los casos más espectaculares es el de los escarabajos peloteros. Éstos usan la Vía Láctea para orientarse y volver a su hogar. (Dacke, Baird et al. 2013)

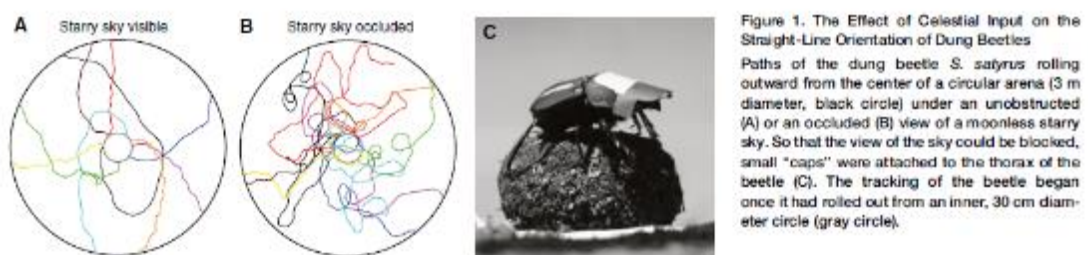


Figure 1. The Effect of Celestial Input on the Straight-Line Orientation of Dung Beetles
 Paths of the dung beetle *S. satyrus* rolling outward from the center of a circular arena (3 m diameter, black circle) under an unobstructed (A) or an occluded (B) view of a moonless starry sky. So that the view of the sky could be blocked, small "caps" were attached to the thorax of the beetle (C). The tracking of the beetle began once it had rolled out from an inner, 30 cm diameter circle (gray circle).

Figura 2.15 Imagen de los experimentos realizados en el artículo "Dung Beetles use the Milky Way for orientation". (Dacke, Baird et al. 2013)

- Incremento de la actividad de insectos: Esto puede generar favorecimiento a especies, que tengan mayor tamaño. Un estudio demuestra que insectos depredadores pueden incrementar su tamaño

medio al verse favorecida su actividad de alimentación. Es pasa por ejemplo con las arañas en algunos estudios realizados (Lowe, Wilder et al. 2014):

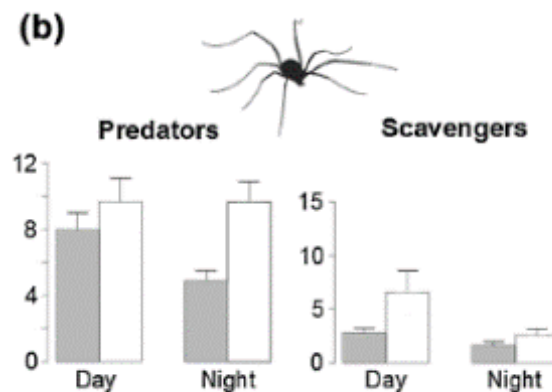


Figura 2.16 Modificación de las posibilidades predatoras de especies (Gaston, Duffy et al. 2014)

- **Efectos sobre vertebrados:** Con carácter general, los efectos tienen una gran variabilidad en función de la especie estudiada. A pesar de ello, se puede observar que, en general, las especies migratorias se pueden ver afectadas porque la luz artificial nocturna dificulta la navegación (Lacoeuilhe, Machon et al. 2014) y puedan dificultar el movimiento por determinados espacios, con la consecuente mortandad asociada.

En general, las especies diurnas se ven favorecidas, pues amplían su hábitat natural de caza (temporal), al disponer de más tiempo-espacio (Lacoeuilhe, Machon et al. 2014).

A continuación se particulariza:

- **Efectos sobre los anfibios:** Son especialmente vulnerables a los efectos de la CL. Tienen una piel altamente permeable y sensible a la luz y el calor. Se está estudiando si la CL podría ser una causa de la rápida regresión de estas especies, junto otros factores de tipo microbiológicos (Kolbert 2015). Ya desde el año 1993 se detectó variación de comportamientos de forrajeo de las ranas con niveles lumínicos muy bajos (Buchanan 1993). A modo de ejemplo , algunos estudios realizados son:
 - Reproducción: Se ha determinado que la llamada de la rana verde entre macho y hembra también se modifica por la luz intermitente que les ilumina (Rich and Longcore 2006).

- Retraso en el crecimiento: En el estudio de H. Savage, K. Bingel, B. Buchanan, y S. Wise se sometieron a los renacuajos de una variedad de rana Africana *Xenopus laevis* a círculos intercalados de 12 horas de claridad y oscuridad. Durante el experimento, se crearon diferentes niveles de iluminación en ciclos de o noche. Desde ciclos de noche oscura (0,0001 lx), noche de luna clara (0,01 lx) o hábitat iluminado (100 lx). Se demostró que los renacuajos con niveles bajos de iluminación se habían desarrollado mejor que los otros. Incluso los ciclos lunares y la variación de nivel lumínico de la noche provoca retraso en la metamorfosis. De forma que el atraso de su desarrollo, los hace más vulnerables y tienen riesgo de morir depredados. (Buchanan 1993).
- Variación en el comportamiento de caza: Se realizó un experimento entre sapos donde se establecían áreas de control oscuras en un entorno iluminado. Dada la metamorfosis de la especie (de forma simultánea), se observó que la migración masiva en las ranas, se paraba en áreas iluminadas para presentar una mayor densidad de insectos (Buchanan 1993). Esto provocaba atropellamientos y las hace más vulnerables a las condiciones del entorno.



Figure 3. Attraction of frogs to a candle set out on a small raft. Illustration by Charles Copeland of an experiment in northern Maine or Canada described by William J Long (1901). Twelve or fifteen bullfrogs (*Rana catesbeiana*) climbed on to the small raft before it flipped over.

Figura 2.17 Atracción de las ranas ante una vela, observado en 1901 por William J Long. (Longcore 2004)

-
- **Efectos sobre aves:** Las aves nocturnas también adaptan los ciclos a la alternancia de noche y día. Algunos efectos que les influyen:
 - Efecto barrera o desorientación en la migración: 100 millones de aves mueren al año en EE.UU. y Canadá. Los impactos en edificios o torres iluminadas son el principal desencadenante (ETIBETAS 2009). Hasta el punto que en Nueva York, en la etapa de migración de aves, se apaga la iluminación ornamental de algunos rascacielos (Kinver 2010, News 2015).



Figura 2.18 Recuento de aves en Toronto (ETIBETAS 2009)

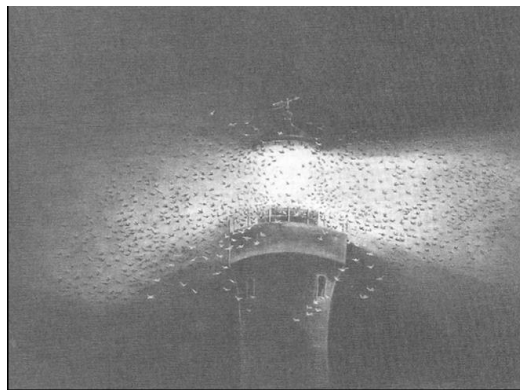


Figura 2.19 Efecto de los faros sobre las aves (Montevecchi 2006)

También las aves se orientan por las estrellas y se ven afectados en este caso, y provocando nuevamente desorientación (Rich and Longcore 2006).

- Efecto barrera y desorientación: Muchas especies migran a micro hábitats para cambiar su proceso vital. Un ejemplo son los polluelos de la *Pardela cenicienta*, que en las noches de octubre y noviembre, abandonan sus nidos en cuevas y acantilados, para empezar su actividad en aguas marinas (Wilhelm, Schau et al. 2013). En las bajadas hacia el mar, se

deslumbran y desorientan. Hay reportados numerosos casos en Tenerife, Malta, Fuerteventura, Philip Island... (Rodríguez, Rodríguez et al. 2011) (Mula Laguna 2014) (Pilar 2012) (Raine 2007) (Troy, Holmes et al. 2011)

- Aumento en los periodos de recogida de forraje: Esta actividad se produce durante el día, pero las aves aumentan el proceso durante la noche y la iluminación artificial (*Falco naumanni*, *Fulica atra*...) (Santos, C. Miranda et al. 2010)
- Dificultad de ocultación de aves predatoras: Hay aves que se ocultan en la oscuridad, para dificultar que sean vistas y facilitar su actividad de presa. Por ejemplo las lechuzas, búhos cazan en niveles lumínicos de gran oscuridad (niveles por debajo de 0,01 lx). Si los niveles son superiores, se producen alteraciones en el medio y deben esconderse en zonas de cobertura forestal o hábitats de características similares.
- Incremento del canto de los pájaros durante la mañana: Bajo la luz artificial, aumentan su actividad en fases en las que no debieran. Por ejemplo el *Erithacus rubecula* (petirrojo europeo) y el *Turdus merula*, *Turdus. Migratorius*, empiezan a cantar con niveles lumínicos de una media de 1,26 lx, pero ya empiezan con 0,05 lx (Kempnaers, Borgström et al. 2010, Bulyuk, Bolshakov et al. 2014).
- Incremento en la posibilidad de caza: Para *Charadrius hiaticula*, *Charadrius alexandrinus*, *Pluvialis squatarola*, *Calidris alpina*, *Tringa totanus* a partir de 0,74 lx por ejemplo (Gaston, Bennie et al. 2013).
- Alimentación de polluelos: Durante las noches, puesto que se realiza en etapa diurna. Para el petirrojo europeo, por ejemplo (*Erithacus rubecula*) (Perkin, Hölker et al. 2011).
- Variaciones en el periodo reproductivo: Según estudios de Davide Dominoni ("Artificial light at night advances avian reproductive physiology"), se avanza un mes la etapa reproductiva de *Turdus merula*. Este factor, pero, no favorece en general al espécimen. Desequilibra su fisiología (Schoech, Bowman et al. 2013) y la economía de energías a lo largo del año, así como el ecosistema en general. Se demuestra que con niveles lumínicos de alumbrado artificial (dentro de ciudades), los pájaros tienen un comportamiento diferente debido a la variación de los

ciclos circadianos, creados por la luz recibida (Brandstätter 2001). Incluso para niveles de resplandor luminoso (0,3 lx para el mirlo) (Kempenaers, Borgström et al. 2010, Domini 2013, Dominoni, Quetting et al. 2013, Dominoni, Carmona-Wagner et al. 2013). Se muestra el desconocimiento actual de la problemática y el funcionamiento de los ciclos circadianos y sus efectos en las aves. Lo que refleja el estado del arte actual, es la importancia de bajos niveles de luz en este tipo de animales, y la modificación de sus ciclos biológicos (Dominoni 2015).

- **Efectos sobre reptiles:** Los reptiles también tienen actividad nocturna, en función de su especie (serpientes, lagartijas...). A modo de ejemplo ilustrativo:
 - Los procesos de reproducción: Pueden verse afectados. Hay especies que utilizan la oscuridad para protegerse de los depredadores en sus etapas más vulnerables, y son sensibles a todo tipo de luz (Rivas, Santidrián Tomillo et al. 2015). Un claro ejemplo, y muy estudiado, son las crías de *Caretta Caretta* (Angel 2014) . Toda luz les afecta, y cuando acaban de salir el huevo se orientan con la luz recibida del mar (reflejo de Luna o estrellas). Si hay luz en el paseo marítimo, hoteles o parecido, se desorientan y acaban exhaustas y/o expuestas a depredadores.

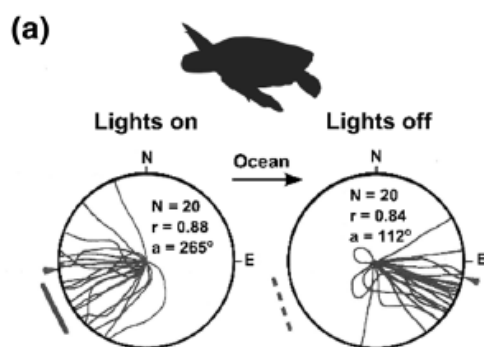


Figura 2.20 Modificación del camino que siguen las crías al nacer (Gaston, Duffy et al. 2014)

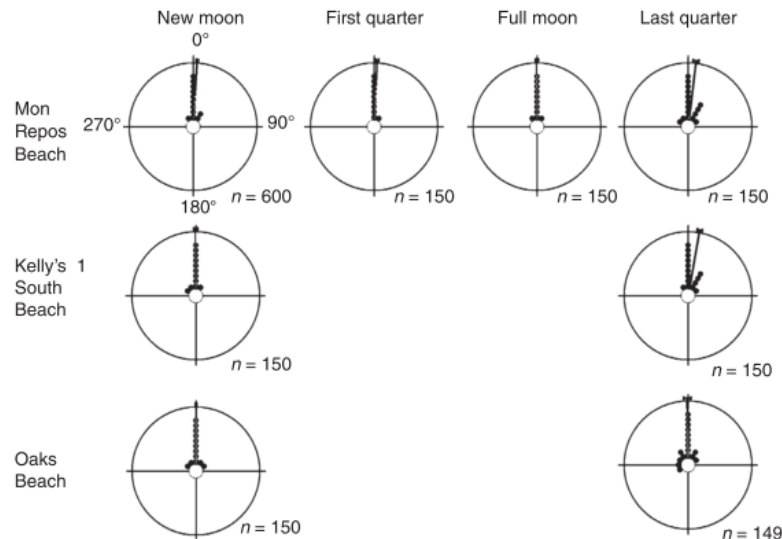


Figura 2.21 Modificación de la ruta de las tortugas neonatas en función de la fase de la luna (Berry, Booth et al. 2013)

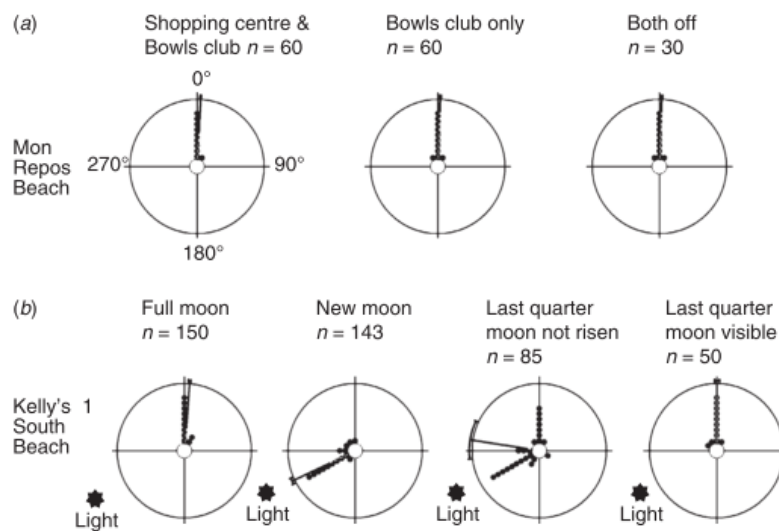


Figura 2.22 Modificación de la ruta de las tortugas neonatas en función de la fase de la luna y luces en su entorno (Berry, Booth et al. 2013)

Su sensibilidad es tan elevada, y la reducción de entornos para hacerlo ha sido tan dramática, que un desove en una playa mediterránea se puede transformar en una noticia (Ramos-Salvat 2014).

- Reducción de la actividad nocturna: Para el *Crotalus Viridis*, a partir de niveles lumínicos superiores a 1 lx (Gaston, Bennie et al. 2013).

➤ **Efectos sobre peces:** Los peces son sensibles a la luz. De hecho los pescadores utilizan el recurso a modo de sistema de atracción hace años (Gengnagel,

Wollburg et al. 2013). También se usa en la industria piscícola para aumentar la producción(Carrillo 2006). Algunos estudios son:

- Atracción: Por ejemplo el *Mukene*, este pez pequeño y plateado se ve atraído por la luz. Un método muy utilizado para la pesca y pone en peligro individuos inmaduros de la especie.
- Modificación en la reproducción: La luz dentro del agua aumenta con la profundidad y densidad de los peces. Esta influencia hace que se retrase su reproducción y por lo tanto crecimiento.
- Alteración de ciclos circadianos: Los peces también se mueven con la alternancia luz y día y los ciclos circadianos. La *Perca Fluviatilis* se empiezan a distorsionar con 1 lx y de forma generalizada con 10 lx(Bruning, Holker et al. 2015).
- Detección de presas: El salmón se ve favorecido en su actividad (en detrimento de otras especies) con niveles lumínicos entre 0,01-5 lx.
- Repulsión: Granjas de Halibut o Fletanes. Que muestran su repulsión y se ven afectados por la radiación ultravioleta.
- Modificación del hábitat nocturno acuático: El agua tiene una influencia muy importante en lo que se denomina migración vertical en el agua (viaje de crustáceos y zooplancton a capas superiores durante la noche y bajas durante el día). Con niveles inferiores a 0,1 lx ya se ven afectados. (Boscarino, Rudstam et al. 2009) (Perkin, Hölker et al. 2014) (Perkin, Hölker et al. 2011) (Rahmah, Senoo et al. 2013).
- Alteración en los tiempos de migración: Para el *Salmón salar*, y niveles de 14 lx (Riley, Bendall et al. 2012).

- **Efectos sobre mamíferos. Los ciclos circadianos:** Muchos tiene comportamiento nocturno, sobre todo los cazadores. Esto es porque la pérdida de la oscuridad puede alterar su entorno donde consiguen el alimento.

Además, los mamíferos como todo ser vivo se rigen, por el denominado circadiano, que modifica nuestra actividad en función de si es día o noche. Las hormonas de actividad (cortisol o similar) y las de recuperación o descanso (melatonina o similar) están totalmente supeditados a los ciclos de luz y oscuridad. Las alteraciones débiles pueden afectar también la fisiología y comportamiento de las especies y con las consecuentes modificaciones del ecosistema.

A modo de ejemplo y según estudios realizados:

- Favorecimiento de cazadores para la atracción de especímenes a la luz: Para algunas especies de murciélagos, en las que comportamiento es muy variable y algunas pueden ser más o menos sensibles a la luz, incluso indiferentes. Algunos huyen y se ven afectados por la reducción de su terreno de caza. Otros en cambios se ven favorecidos: Por ejemplo el *Pipistrellus pipistrellus*, es una especie muy pequeña que vuela relativamente rápido y con muchos cambios de dirección. Ha aprendido que los insectos se ven atraídos por las fuentes de luz y se alimenta de forma abundante alrededor de las farolas. De todas formas no se puede promover un comportamiento generalizado para la familia de los murciélagos en general (Lacoeuilhe, Machon et al. 2014). Esto origina una alteración del equilibrio del ecosistema. Ocurre a niveles de alumbrado vial (20-30 lx).
- Pérdida de zonas de caza para especímenes nocturnos: Por ejemplo los leones son depredadores nocturnos y buscan la luna nueva o como mucho un 40% de la Luna para desarrollar su actividad de ocultación ante la persa. Con luna llena cazan mucho menos. Es decir: Prefieren cazar con niveles inferiores a 0,15 lx (Packer, Swanson et al. 2011).
- Dificultades para alimentarse para pequeñas especies: A algunas nocturnas, como los ratones de playa, les cuesta alimentarse en zonas ligeramente iluminadas debido a la exposición a depredadores.
- Alteración de ciclos circadianos: Se ha detectado ya en ratones para niveles superiores a 0,01 lx, pero en todo tipo de mamíferos puede haber alteraciones de las concentraciones hormonales, y en particular de los ciclos circadianos (Giannetto, Fazio et al. 2011). Incluso a niveles de alumbrado público de luz de sodio y para primates (Le Tallec, Perret et al. 2013).
- Reducción nocturna de la actividad: Por ejemplo en ratones (como el *Phyllotis xanthopygus*), a niveles lumínicos superiores a 1,5 lx. Eso quiere decir que hay menos posibilidades de alimentación. Ocurre a diversas especies de ratones nocturnas (Kramer and Birney 2001) .

A modo de pequeña conclusión de este apartado: Se puede observar que la rama de la biología, bautizada como Escotobiología, está en una etapa incipiente de desarrollo. Actualmente se están realizando numerosos estudios para conocer las repercusiones de la luz sobre los seres vivos y los ecosistemas en general. Con carácter global, la biodiversidad y los ecosistemas nocturnos se ven afectados por:

- Elementos de alta luminancia y puntos brillantes (proyectores, alumbrado ornamental, luminarias de F.H.S.i. elevado) y crean unos efectos de atracción o barrera, etc.
- Niveles lumínicos en ciudades o proximidades más cercanas. Aumento de los niveles lumínicos nocturnos pueden llegar a variar la concentración hormonal de determinados mamíferos.
- Niveles lumínicos de fuera de las ciudades, incluso en zonas lejanas, debido a brillo del cielo que hace de emisor de luz residual (Kyba, Ruhtz et al. 2011, Kyba and Hölker 2013). Estos niveles, pueden ser suficientes para alterar comportamientos de caza, reproducción etc., en animales de vida nocturnos.

Además, el hecho de que la visión de los otros seres vivos pueda ser diferente a la nuestra, hace que puedan ser especialmente sensibles a la luz en la componente azul. Incluso en poca componente azul, **si la luz es blanca, puede tener una interferencia muy importante en el medio. Incluso de forma independiente a la temperatura de color.** Más bien el hecho determinante es la existencia de la componente azul. Se ha reportado además que no es suficiente con conocer aspectos cualitativos de las fuentes de luz (como IRC o temperatura de color), sino que debe conocerse su espectro de emisión; puesto que para características similares (Poiani, Dietrich et al. 2015), los seres vivos se comportan de forma diferente. Los insectos son especialmente sensibles a estas bandas, incluso les produce la muerte (Hori, Shibuya et al. 2014, Pawsonl 2014).

La evidencia científica muestra que para las especies nocturnas, cualquier distorsión en su entorno oscuro afecta al equilibrio natural y puede alterar las interacciones sociales naturales (Kurvers and Hölker 2014). Puesto que los escenarios luminosos deben ser naturales también, y proporcionar un equilibrio al entorno:



Figura 2.23 y Figura 2.24 . Algas luminiscentes en el sudeste asiático(Hart 2015) y luciérnagas en Illionois (Illinois_Coalition_for_Responsible_Outdoor_Lighting 2011)

2.2.2 Sobre la hábitat humano.

Las repercusiones que hacen referencia al ser humano son de las más estudiadas, por razones obvias. Existen de gran variedad y tipología. En este apartado se hará una enumeración simple, proporcionando cierta atención a la que posteriormente será ser cuantificadas (apartado 3).

El ser humano es un ser vivo más del ecosistema, pero su idiosincrasia y comportamiento como animal-social, hace que las repercusiones tengan una connotación diferente.

EFFECTOS SOCIOECONÓMICOS:

El primer efecto que se puede mencionar, es el relacionado directamente con el **coste económico**. La contaminación lumínica es energía no aprovechada, puesto que va a un lugar que no es útil para su servicio, y por ende, causando una serie de daños añadidos. Desde el año 2001 se analizan en España estos efectos. En el Plan Piloto de Contaminación Lumínica de Catalunya en el año 2001, el flujo lumínico contaminante de Catalunya se cuantificó en 650 millones de lúmenes: aproximadamente la luz derrochada de 1 millón de lámparas de incandescencia de 60W (Torra and San Martin Páramo 2001). La Universidad Complutense ha desarrollado diversos trabajos al respecto, comparando imágenes por satélite y alertando de este problema, sobre todo de España respecto a otros países del entorno (Sanchez de Miguel 2010, Sanchez-de-Miguel 2015, Sanchez de Miguel 2015).

Evidentemente, y relacionado directamente con el coste económico están el derroche energético y **emisiones de Gases de Efecto Invernadero**. En una aproximación extraída de estudios realizados al respecto: Una farola tipo emite 1,2 kg CO₂eq al día (Garcia Gil 2012). Si se consideran los 1,4 millones de puntos de luz existentes en Catalunya y el 22% de UUF medio: Podemos extraer que la CL es aproximadamente responsable de 134.904 Tn CO₂eq al año en Catalunya: un problema de carácter global.

Otra repercusión es la **cultural**. La noche ha sido inspiradora de la ciencia y la cultura humana desde el inicio. Desde la incitación a los de mitos y religiones, al desarrollo científico y artístico.

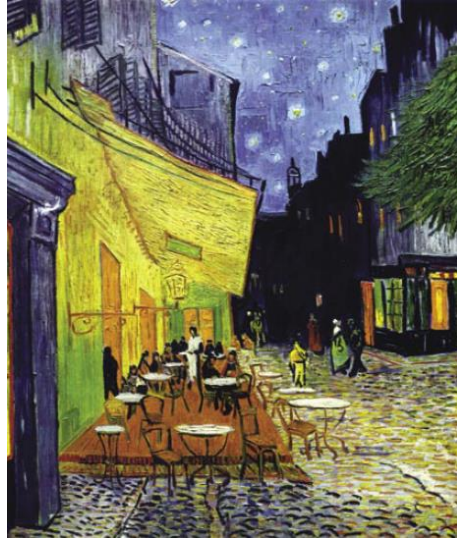


Figura 2.25. y 2.26. Café Terrace at Night (Vincent Vang Gogh) y pirámide escalonada de Teotihuacan para observaciones astronómicas (STARLIGHT 2007).

La noche, su misterio y búsqueda de las respuestas a su inmensidad, ha sido una inspiración para el desarrollo de la civilización humana. Actualmente la falta de “ventanas al universo”, hace que se tenga que recurrir a muy pocas ubicaciones en la Tierra, o a telescopios fuera de nuestro planeta, como el Hubble.

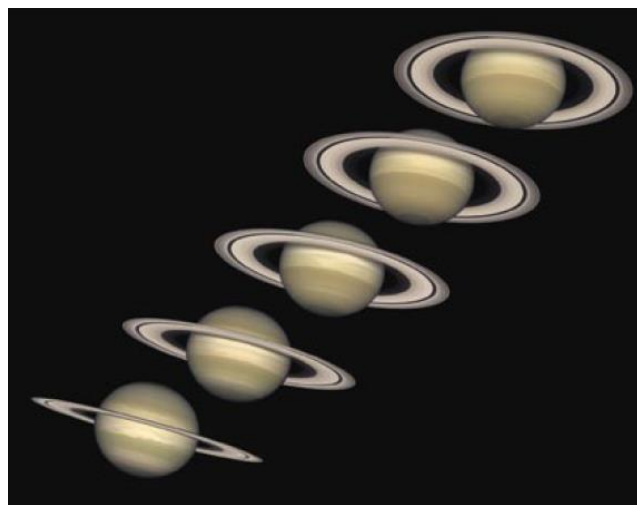


Figura 2.27. Saturno visto desde el telescopio Hubble NASA. © (STARLIGHT 2007).

Otras repercusiones son las relacionadas con las **molestias informativas** durante la noche. El exceso de luz no garantiza una buena visión. Y es que estos dos conceptos no se corresponden directamente. Una gran cantidad de luz y sobre todo la luz mal dirigida, ocasiona deslumbramiento, molestias informativas y luz intrusa en lugares donde se debiera estar en descanso. Estas afectaciones están muy estudiadas desde el punto de vista de confort visual, pero a menudo olvidadas en iluminación de espacios públicos durante la noche:



Figura 2.28. Iluminación de plaza pública. Gran nivel y deslumbrante. Elaboración propia



Figura 2.29. Montajes fotográficos ejemplo alumbrado deslumbrante (GEORGIA_SEA_TURTLE_CENTER 2013).

Las repercusiones **fisiológicas**, son las más estudiadas recientemente, debido al descubrimiento de las células ipRGC a principios de este siglo (Brainard. 2001, Thapan, Arendt et al. 2001).

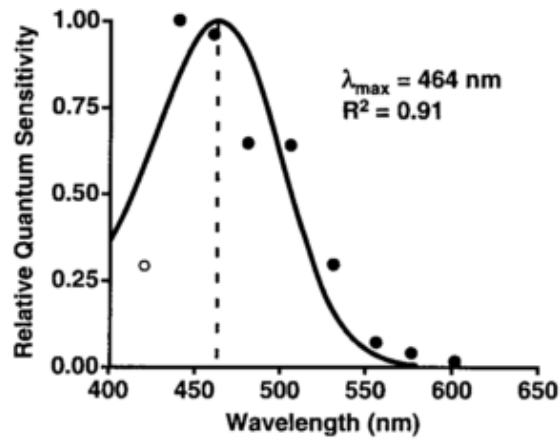


Figura 2.30. Primeros datos para determinar la sensibilidad de las células descubiertas en 2001 (Brainard. 2001)

Estas células, tienen una sensibilidad diferente a la de los conos y bastones:

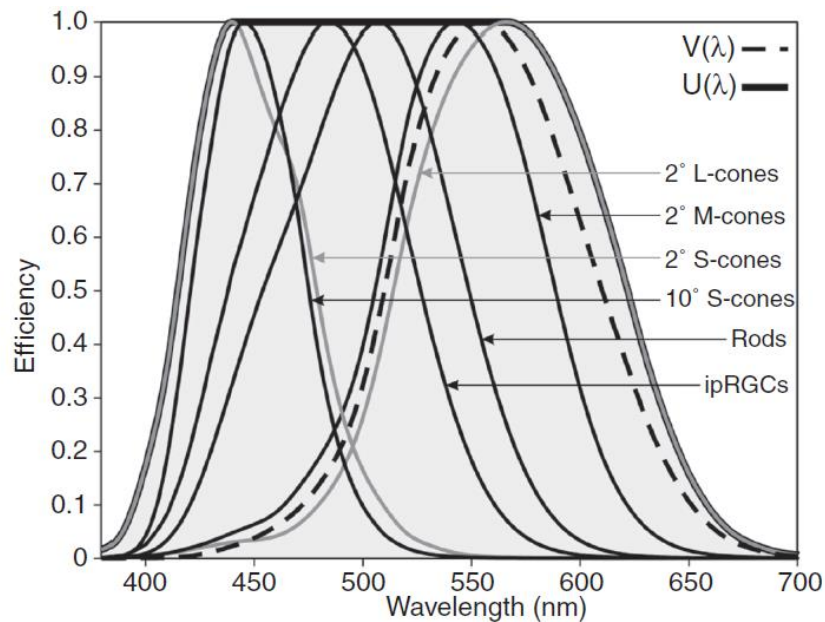


Figura 2.31. Función de eficiencia de las diferentes células del ojo humano (Rea 2015)

Las señales proporcionadas por estas células, al igual que el ejercicio físico, la alimentación y costumbres, son las entradas que el organismo recibe en el hipotálamo, responsable de la regulación circadiana del reloj corporal central y periféricos, mediante la segregación hormonal. La repercusión más importante es que el nivel de luz es uno de los desencadenantes más importantes en la inhibición de la melatonina.

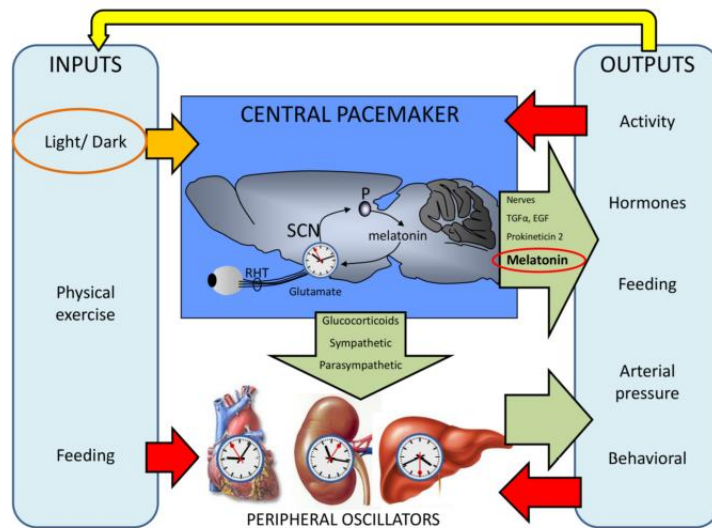


Figura 2.32. Sistema circadiano. Entradas y salidas responsables (Bonmati-Carrion, Arguelles-Prieto et al. 2014).

Multitud de publicaciones se han sucedido posteriormente (Middleton, Stone et al. 2002, Berson 2003, Hollan 2004, Pauley 2004, Bierman, T. R. Kkein et al. 2005, Blask, Brainard et al. 2005, Saper, Scammell et al. 2005, Figueiro, Appleman et al. 2006, Hankins, Peirson et al. 2008, Viola, James et al. 2008, Kloog, Haim et al. 2009), y su número se incrementa año a año. Como se podrá ver en el apartado 3, se han desarrollado modelos matemáticos para predecir las repercusiones, con el objetivo de aproximar el descenso del nivel de melatonina en sangre o saliva en función de la irradiación recibida por el ojo humano.

El conocimiento de los efectos sobre la salud por la falta de sincronía del reloj circadiano son múltiples van siendo descubiertos continuamente. Desde el aumento de la probabilidad de tener cáncer de mama o próstata (Wang, Ren et al. 2014) (Kloog, Portnov et al. 2011, Peplonska, Bukowska et al. 2012), la obesidad (Kloog, Portnov et al. 2011), envejecimiento prematuro (Krishnan, Rakshit et al. 2012, Ortiz-Tudela, Bonmatí-Carrión et al. 2012), variación hormonal en el embarazo (Wada, Nagata et al. 2012), insomnio (Wada, Nagata et al. 2012), incremento de presión sanguínea durante la noche en ancianos (Obayashi 2014) , y un largo etc.

Y es que la "Intenational Agency for Research on Cancer" (en el año 2007 y en un primer paso), ha concluido que el trabajo a turnos que implique disrupción circadiana es probablemente carcinogénico en humanos (Considerado en el grupo de factores 2A)(Rol, Otálora et al. 2014) .

2.2.3 Sobre la oscuridad del cielo.

La afectación sobre el cielo nocturno, tiene repercusión sobre la observación de cuerpos celestes. Se ven los astros por contraste: su brillo destaca durante la noche sobre la oscuridad natural. Durante el día, cuando la luz del Sol aclara el cielo, no podemos verlos pese a que siguen estando ahí:

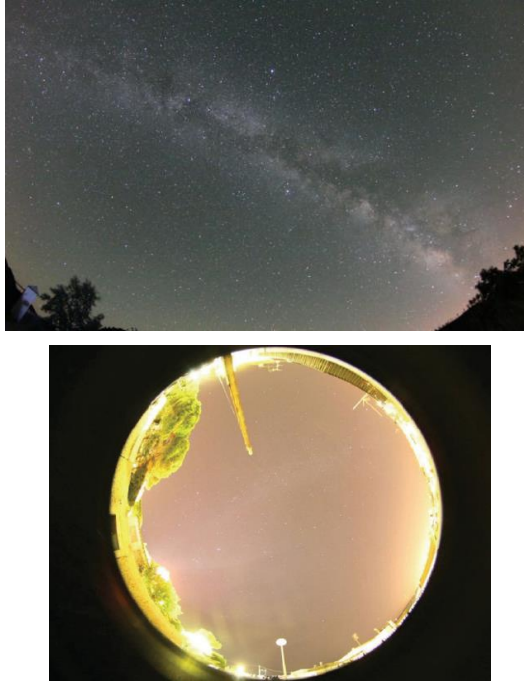


Figura 2.33 y 2.34 Imagen de cielo en Parque Natural Aracena y Picos de Aroche y en zona deportiva de Barcelona.

El contraste se calcula con la siguiente fórmula (Narisada and Schreuder 2004):

$$C = \frac{L_o - L_b}{L_o} \quad \text{Fórmula 2.1}$$

Donde:

C: Es el contraste

L_o = Luminancia del objeto que queremos ver

L_b =Luminancia de la superficie donde o fondo en la que se sitúa visualmente el objeto. (b:background)

Pero cuando hay diferentes puntos brillantes en la escena visual y teniendo en cuenta todo el cambio de visión, se define lo que se llama Luminancia de velo (L_v) como la equivalente a tener un velo en el fondo del objeto a ver. De forma que tenemos un contraste de campo visual en:

$$C = \frac{L_o - L_b}{L_b + L_v} \quad \text{Fórmula 2.2}$$

Donde:

C': Es el contraste en el campo visual
L_o= Luminancia del objeto que queremos ver
L_b=Luminancia de la superficie donde o fondo en la que se sitúa visualmente el objeto. (b:background)
L_v: Luminancia de velo.

Y siempre $C' < C$, por lo que el objeto es más difícilmente identificable todavía.

Cuando la luminancia de velo es más grande que la del astro que queremos ver, no destaca, y éste no se puede observar. Es la dispersión de la luz en la atmósfera induce al aumento de la claridad del fondo celeste. A medida que la claridad aumenta, cada vez existen menos estrellas visibles, hasta el punto de poder desaparecer por completo.

La problemática es global y se puede analizar por zonas muy dispares (Solano Lamphar 2010, Kocifaj 2011, Gómez Castaño, Sánchez de Miguel et al. 2013, Spoelstra 2013, Garcia Gil and Estrada Garcia 2014, So 2014). Estudios realizados por todo el mundo muestran la influencia en el brillo del cielo a zonas alejadas, decenas e incluso centenas de kilómetros (Beniie J., Davies T.W. et al. 2014, Pun, So et al. 2014).



*Figura 2.35 Imagen en colores falsos de la influencia de Las Vegas situada a 112 km.
(National_Park_Service_U.S. 2013)*

El proceso está ampliamente estudiado y modelizado (ver apartado 3.3): es la repercusión más conocida y quizás el principal conocimiento de CL en el público en general.

Esta afectación, produce además un **efecto sinérgico en la problemática**. El hecho de que el cielo brille, lo convierte a su vez en un emisor de luz, es decir, se convierte en fuente contaminante de CL. Este factor es importante para considerar la alteración de los ecosistemas naturales, sobre todo teniendo en cuenta el incremento del brillo en días nublados (Kyba, Ruhtz et al. 2011, Kyba and Hölker 2013).

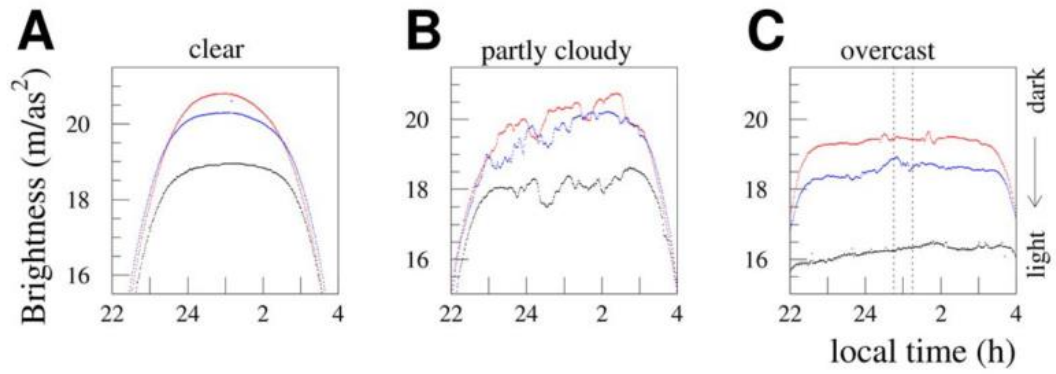


Figura 2.36 Ejemplos de brillo del cielo observado en diferentes condiciones de nubes. Hay un incremento de hasta 10 veces el brillo del cielo debido a este factor. (Kyba, Ruhtz et al. 2011)

Hasta el punto de que el brillo es equivalente al de la luna llena, o incluso superior y se incrementa la equivalencia a horas de noche con alta brillo (Davies, Bennie et al. 2013).

2.3 Fuentes de la CL: Alumbrado artificial nocturno.

En un proyecto luminotécnico, para determinar la implantación y las características de los sistemas lumínicos utilizados, se sigue un proceso de diseño. De forma breve, podemos citar las siguientes fases:

- Análisis de las necesidades y del entorno: Consideración de la actividad, la precisión, la densidad de uso y la seguridad necesarias en la zona a iluminar.
- Condiciones lumínicas: Según las características de la actividad (dimensión de los objetos, contraste, velocidad, etc.) la tarea visual a realizar puede ser más o menos fácil y necesitará una iluminación más o menos exigente. Por ello se deberá estudiar la **cantidad y calidad de la luz** que vamos a necesitar, independientemente de los artefactos que utilicemos. A través de la normativa, las recomendaciones o la reglamentación vigente, se determinarán las características lumínicas que deberán cumplirse para garantizar la actividad analizada en la fase anterior.
- Elección de los sistemas de alumbrado. Conjunto de elementos (lámpara, reflectores, pantallas...) necesarios para poder cumplir con las condiciones lumínicas. Para poder determinar estos sistemas hay que consultar la reglamentación vigente y las bases de datos de los productos del mercado (lámparas, proyectores...).
- Dimensionado y cálculo mediante software especializado. Para determinar la cantidad, la ubicación y la potencia de los sistemas de alumbrado utilizados en cumplimiento de las condiciones lumínicas. Si no es posible cumplirlas, habrá que seleccionar otros sistemas de alumbrado.

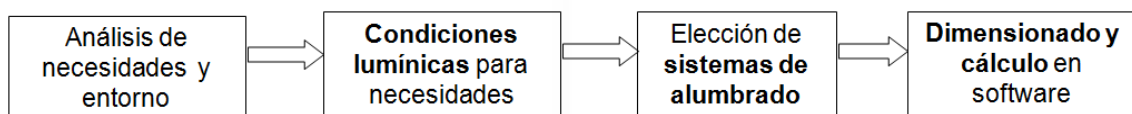


Figura 2.37 Proceso básico en el diseño de un proyecto de alumbrado artificial (García Gil, San Martín Paramo et al. 2012)

En todo caso, cualquier alumbrado artificial nocturno que emita radiación proveniente de la fuente luminosa hacia un entorno oscuro debe considerarse foco potencial de CL. Esta instalación puede ser alumbrado público (calles, plazas, paseos, etc., en general vía pública), comercial, doméstico, señalización, deportivo, etc.

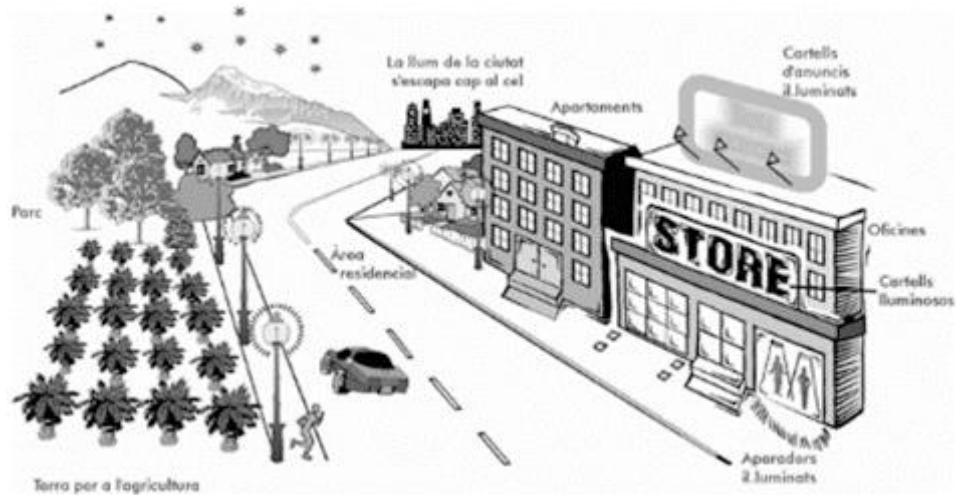


Figura 2.38 Procedencia de luz artificial nocturna (Celfosc.org 2001)

O cualquier otro, por particular que sea: espectáculos temporales, aerogeneradores, faros, u otros particulares. Como se puede ver en las fotografías tomadas desde la I.S.S. incluso la industria productiva, en concreto barcos pesqueros:



Figura 2.39 Imágenes de la ISS donde se ven puntos blancos caóticamente distribuidos, testimonio de la industria pesquera entre Japón y Corea del Sur (Günter 2015)

Con carácter general, la dimensión del foco viene dado por las:

- Condiciones de lumínicas y la cantidad de luz que indica la magnitud de la energía radiada que se emite.
- Características de los sistemas de alumbrado, que define la forma en que esta energía se emite, en dirección, intensidad y principalmente, el rango espectral.
- Entorno de instalación: Urbanización, superficies...

2.3.1 Condiciones lumínicas y cantidad de luz.

La cantidad de luz se representa por el nivel lumínico que el usuario necesita para desarrollar su labor en unas condiciones determinadas de seguridad y calidad. Se puede representar mediante:

La iluminancia o nivel de iluminación (E). Es la cantidad de flujo lumínico que cae en una superficie. Su unidad es el lux = lumen/metro cuadrado. [$\text{lx}=\text{lm}/\text{m}^2$]

La luminancia (L). Es la excitación del ojo humano a través de la incidencia de una intensidad luminosa por unidad de superficie. Su unidad es la candela por metro cuadrado [cd/m^2].

El proyectista debe adoptar, a la hora de realizar sus cálculos, los valores recomendados y establecer como máximo un margen prudente –del orden del 20%– para poder atender posibles singularidades del proyecto. Un incremento del nivel lumínico, también es un incremento de las repercusiones medioambientales, en todas sus facetas.

También hay otras variables, igual o más importantes a considerar en las condiciones lumínicas: uniformidad, deslumbramiento, etc. Su consideración actualmente es a nivel de proyecto lumínico, y su optimización se suele utilizar a modo de experiencia profesional aplicada. Existen pocos métodos de desarrollo implantados en la industria luminotécnica. En el campo de la investigación hace años que se ha trabajado mediante las características de implantación y tipología de elementos de alumbrado, con los niveles lumínicos y las condiciones de calidad (uniformidad, eficiencia, etc.).

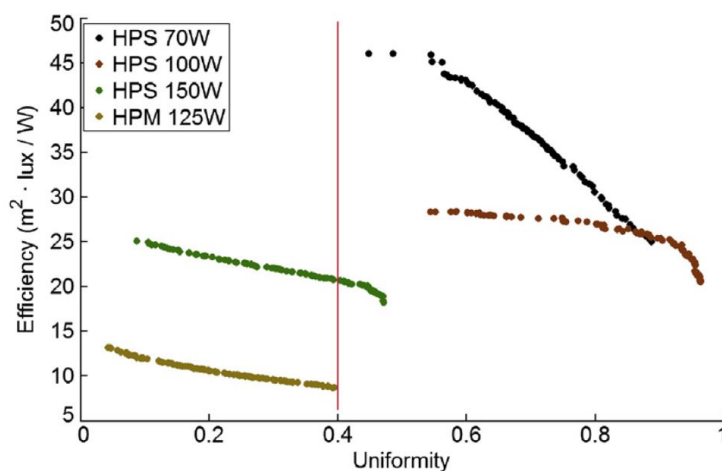


Figura 2.40 Valores de eficiencia respecto a la uniformidad, en función de diferentes soluciones lumínicas aplicadas en un proyecto (Gómez-Lorente, Rabaza et al. 2013).

2.3.2 Sistemas de alumbrado.

El alumbrado artificial es el conjunto de artefactos que sirven para generar energía lumínica y crear unas condiciones determinadas de iluminación. Son las farolas, las lámparas... Estos "artefactos" se denominan sistemas lumínicos y pueden ser:

- Fuentes de luz (o lámparas): Transformadores de energía, normalmente eléctrica en lumínica.
- Luminarias: Dispositivos que alojan y protegen la fuente de luz y reconduce la luz hacia donde se quiere iluminar.
- Elementos de control y regulación: Dispositivos que gestionan el funcionamiento de los anteriores.

FUENTES DE LUZ

Las lámparas o fuentes de luz son aquellos elementos que transforman la energía primaria (normalmente, eléctrica) en lumínica. Se introducen dentro de las luminarias para que su flujo lumínico se distribuya de la forma más adecuada posible según su uso. Sus características más importantes son:

Flujo lumínico. El flujo lumínico, Φ , expresado en lumen [lm], es la potencia emitida por la lámpara en forma de radiación luminosa a la que el ojo humano es sensible. Indica, por tanto, la cantidad de luz que puede proporcionarnos por unidad de tiempo.

Cuando hablamos de potencia de una lámpara, nos referimos normalmente a la potencia eléctrica [W] necesaria para alimentar su funcionamiento. El concepto de eficacia luminosa, descrito más adelante, permite relacionar esta magnitud con el flujo lumínico emitido, que se expresa en lúmenes.

Espectro de emisión. El espectro de emisión muestra la energía radiada por la lámpara. Normalmente, se muestra n valores de energéticos en un eje Y según la longitud de onda en la que se emite en nanómetros [nm] (en el eje X).

Para que las lámparas, como transformadoras de energía, pudieran trabajar con más alto rendimiento, casi toda la energía absorbida deberían transformarla en radiación visible. Por otra parte, su luz debería ser blanca, como la del día, y con buena reproducción cromática, lo cual exige un espectro continuo que contenga todos los colores principales, desde el violeta hasta el rojo. Pero como la sensibilidad del ojo es máxima para la radiación amarillo-verdosa, lo más favorable para el rendimiento luminoso es obtener el porcentaje mayor de radiación en la zona de 555 nm.

Las radiaciones en las longitudes de onda más cortas (sobre todo por debajo de los 440 nm) son las más nocivas en lo que a fenómenos de CL se refiere, puesto que se dispersan más en la atmósfera y afectan más a los seres vivos.

En el anexo B se presenta una clasificación de elementos de alumbrado que con sus características principales sirve para caracterizar su situación respecto a la CL. Las fuentes de los datos obtenidos han sido también resumidos en la publicación del autor de la tesis: "Contaminación lumínica. Una visión desde el foco contaminante: El alumbrado artificial" (García Gil, San Martín Paramo et al. 2012), y tienen como principales orígenes, los principales fabricantes de sistemas de alumbrado (Philips Lighting 2015), (OSRAM 2014), (GE Lighting 2014), y algunas clasificaciones hechas para informes o estudios previos (García Gil 2001, García Gil and Sanyé 2001, García Gil 2009, Tapia, Sánchez de Miguel et al. 2015).

Las lámparas expuestas en el mencionado anexo B son:

- Vapor de sodio: de alta y baja presión
- Halogenuros metálicos: quemador cerámico o de cuarzo
- Vapor de mercurio
- Fluorescencia
- Inducción
- LED

Y se describen las características más representativas para la problemática analizada.

LUMINARIAS

La luminaria es el elemento que aloja la fuente de luz y distribuye –mediante espejos, prismas, difusores...– la iluminación en distintas direcciones del espacio. Entre sus características más importantes destacan las siguientes.

Distribución lumínica. La forma en que una luminaria distribuye en el espacio su emisión de luz es fundamental en la problemática de la CL. Esta distribución adopta formas diferentes, en muchos casos.

La fotometría es la representación de cómo las luminarias extraen el flujo lumínico, tanto en intensidad como en dirección. En la figura siguiente, se observa una representación polar de tres luminarias. En esta están dibujadas unas curvas en rojo que representan la intensidad con que se emite la luz en esa dirección. En las dos primeras, se pueden ver las diferencias entre dos luminarias simétricas. La primera de ellas es más concentrada e intensa que la segunda, que es más extensiva (abierta). La tercera fotometría muestra una salida lumínica asimétrica de la luminaria.

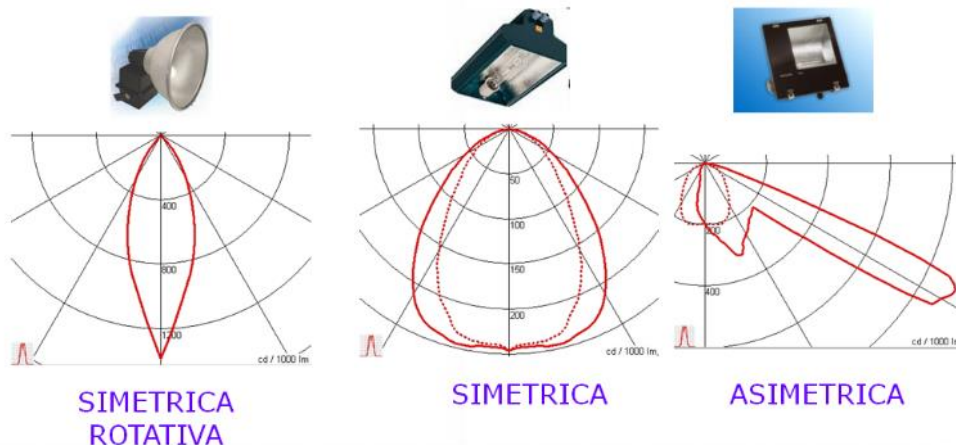


Figura 2.41 Muestras de diferentes fotometrías (Relux 2015)

Los conceptos de distribución lumínica más importantes a considerar, son los siguientes:

Rendimiento (η). En inglés Lighting Output Ratio (L.O.R.). Fracción de luz que sale de la luminaria con respecto a la que sale de la lámpara. Así pues, descontando las inevitables pérdidas por absorción, reflexión, etc.:

$$\eta = \frac{\phi_{\text{SALIENTE_LUMINARIA}}}{\phi_{\text{TOTAL_LÁMPARA}}} \quad \text{Fórmula 2.4}$$

Factor de utilización (Fu). La luz emitida por la luminaria no sólo ilumina la zona necesaria, sino que también alcanza sus alrededores. El factor de utilización expresa el porcentaje que es aprovechado en la iluminación que consideramos útil.

$$Fu = \frac{\phi_{EN_LA_ZONA_ÚTIL}}{\phi_{TOTAL_LÁMPARA}} \quad \text{Fórmula 2.5}$$

El factor de utilización depende de la distribución lumínica de la luminaria, pero también de la amplitud de la zona que se pretende iluminar. No tiene, pues, un valor asimilable exclusivamente a la luminaria, si no a ésta en un proyecto determinado. Se expresa mediante gráficos o tablas.

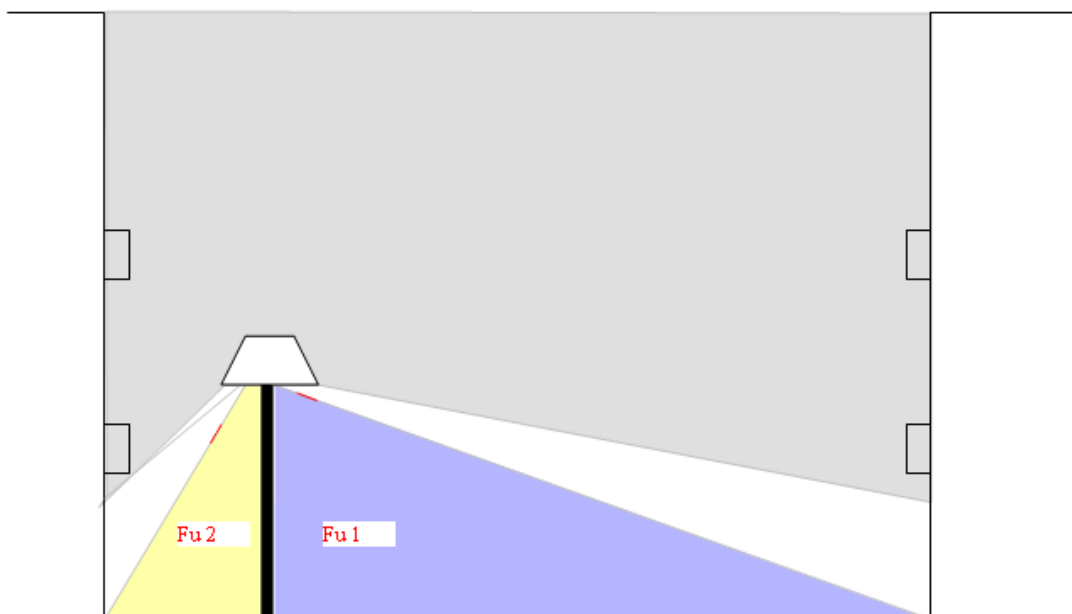


Figura 2.42 Esquemmatización de Factor de utilización hacia acera (Fu2) y calzada (Fu1) (García Gil, San Martín Paramo et al. 2012)

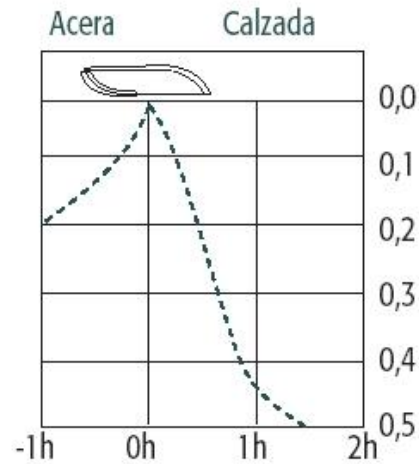


Figura 2.43 Esquema de distribución del factor de utilización según su altura de implantación h (INDAL 2002)

Flujo Hemisférico Superior (F.H.S.). Indica el porcentaje de luz que se emite en direcciones por encima de la horizontal. Es un concepto fundamental en el estudio de la CL. Se expresa de dos formas distintas:

Flujo Hemisférico Superior, en inglés Upward Lighting Output Ratio (U.L.O.R.):

$$F.H.S.(%) = \frac{\phi_{SOBRE_LA_HORIZONTAL}}{\phi_{TOTAL_LÁMPARA}} \times 100 \quad \text{Fórmula 2.6}$$

(Flujo Hemisférico Superior instalado, en inglés Upward Lighting Ratio (U.L.R.):

$$F.H.S.i(\%) = \frac{\phi_{SOBRE_LA_HORIZONTAL}}{\phi_{TOTAL_SALIENTE_LUMINARIA}} \times 100 \quad \text{Fórmula 1.7}$$

Desde el punto de vista de la CL, el concepto más representativo a tomar en consideración –y que es limitado por las reglamentaciones– es el F.H.S. instalado. Es importante no confundirse al examinar la documentación fotométrica de las luminarias. El F.H.S.i. es siempre mayor que el F.H.S. (F.H.S.i. = F.H.S./rendimiento).

En la tabla siguiente, se exponen algunos modelos de luminaria y sus datos fotométricos:




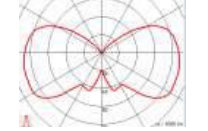

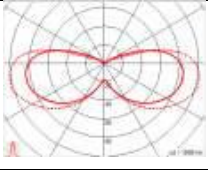



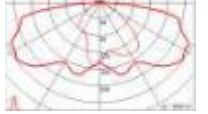

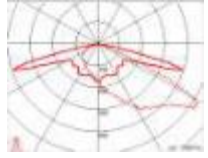
	Description	Image	Typical L.O.R.	Typical U.L.R.	Photometry
A	Unshielded globes		80%	50 %	
B	Globes with minimal shielding		60%	40 %	
C	Ornamental lights		60%	35 %	
D	Streetlights without diffuser		70%	10 %	
E	Drop-lens roadlights		70%	5 %	
F	Flat-lens roadlights		80%	1 %	

Tabla 2.1 Clasificación de luminarias viales según su fotometría típica (Directamente de (Estrada-García, García-Gil et al. 2015))

2.3.3 Variables de entorno.

En la siguiente figura, se observa un caso real de distribución de la luz y se analiza, mediante un esquema, la distribución lumínica de una luminaria y lámpara en un caso real:

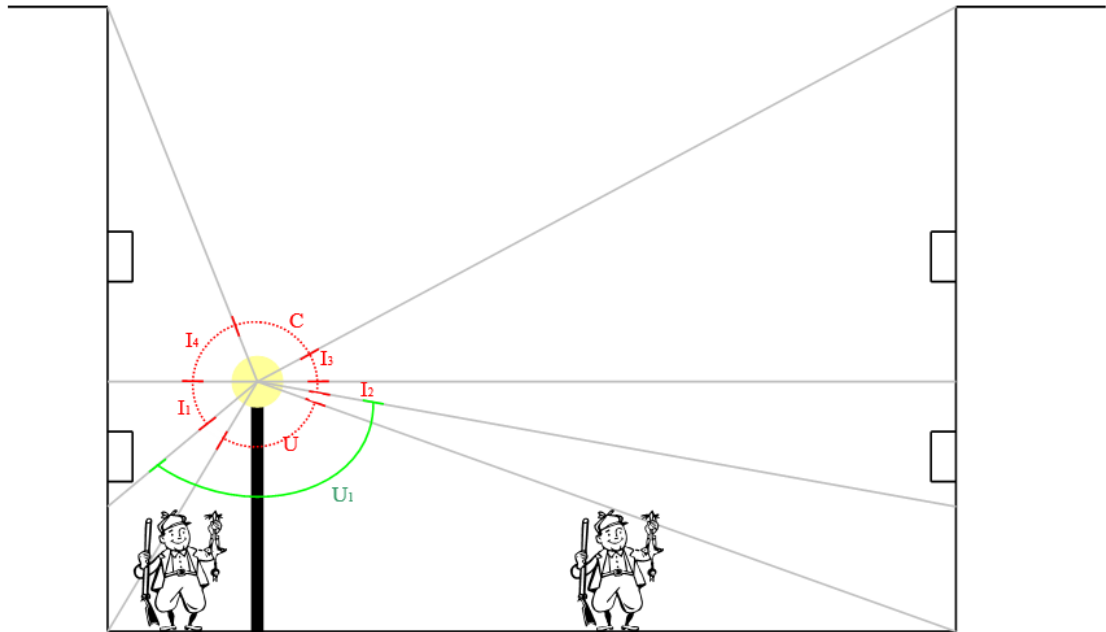


Figura 2.44 Diferentes ángulos de la emisión de la luz en función de la dirección del flujo lumínico, en sección (García Gil, San Martín Paramo et al. 2012)

La línea horizontal que atraviesa la luminaria marca la separación entre el Flujo Hemisférico Superior instalado (F.H.S.i., por encima del horizonte) y el Flujo Hemisférico Inferior instalado (F.H.I.i., por debajo del horizonte).

Del F.H.I.i., únicamente el flujo emitido dentro del ángulo U_1 ilumina la calle. Es, por tanto, lo que debemos considerar flujo útil.

El flujo restante (ángulos I_1 e I_2) incide sobre las fachadas. No contribuye a la visibilidad de la zona y puede causar molestias a sus habitantes, por lo que debe considerarse flujo intruso. No aporta flujo lumínico a las superficies que han de ser iluminadas.

En cuanto al Flujo Hemisférico Superior, el comprendido en los ángulos I_3 e I_4 es también flujo intruso (va hacia las fachadas de los edificios), mientras que el emitido en el ángulo C se dirige hacia la bóveda celeste y constituye el resplandor luminoso directo.

Con diferencias de magnitud, ésta es la situación que se produce en todos los casos. Si los edificios son más bajos, crece la proporción del resplandor luminoso (C); si los alrededores, en vez de edificios, son paisajes, la luz intrusa afecta espacios naturales... La situación óptima se da en la figura del margen inferior, en que toda la luz emitida es flujo útil.

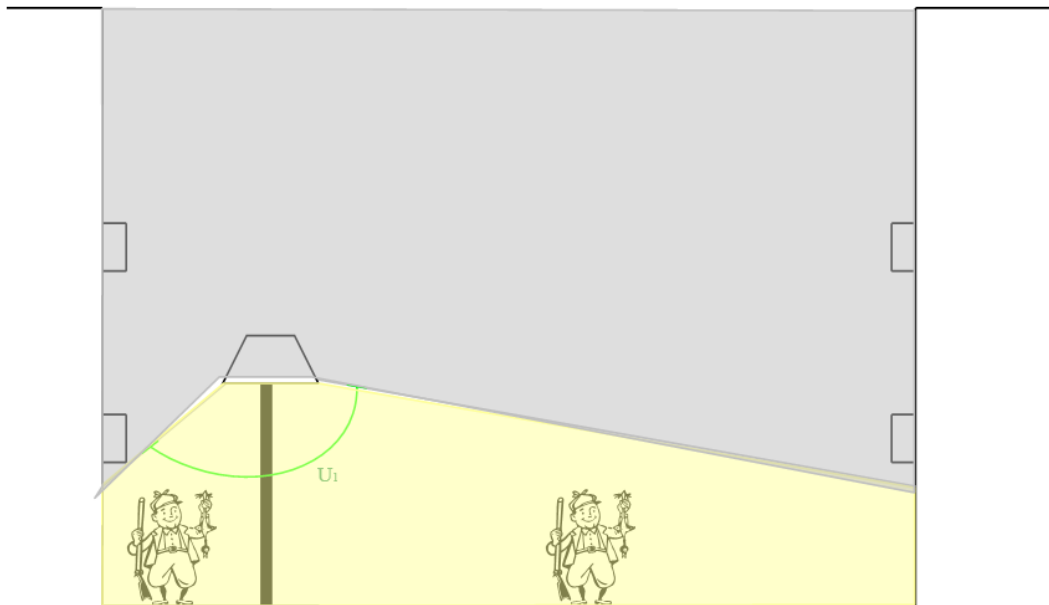


Figura 2.45 Caracterización de flujo lumínico útil, proporcionando servicio allá donde es necesario. (García Gil, San Martín Paramo et al. 2012)

ELEMENTOS DE CONTROL Y REGULACIÓN:

En el proyecto básico luminotécnico, se tiene en cuenta el diseño de las instalaciones en las situaciones más desfavorables, con el objetivo de garantizar siempre el servicio lumínico. Por ejemplo, en el caso de interiores, el diseño prevé artefactos y potencias para el caso de ausencia total de la luz solar.

Sin embargo, no siempre se necesitan las mismas condiciones lumínicas a lo largo del ciclo de funcionamiento. Por ejemplo, una vía de circulación de acceso a una gran ciudad requiere un nivel elevado de iluminación durante las primeras horas de la noche. Pero es posible que la densidad de circulación baje drásticamente de madrugada, por lo que se requieran niveles considerablemente más bajos a los iniciales.

La gestión de los niveles de iluminación necesarios en las instalaciones de alumbrado es importante para garantizar el nivel y el funcionamiento adecuado a las necesidades de

cada momento. Con ello se consigue minimizar la afectación de la CL y el derroche energético al nivel imprescindible a la actividad que se quiera realizar.

Los diferentes tipos son:

- Interruptor. Señal exterior que depende del comportamiento humano. No es recomendado ni permitido por la normativa para instalaciones nuevas.
- Reloj. Accionamiento a una hora determinada del día. No es recomendado ni permitido por la normativa para instalaciones nuevas, por su falta de adecuación a las variaciones de salida y puesta del Sol con las estaciones del año.
- Reloj astronómico. Accionamiento a la hora a la que se pone y sale el Sol. Es programable y debe especificarse la ubicación geográfica de la instalación y la fecha del año, a fin de ajustar el parámetro de funcionamiento. Es el método más recomendado para el uso generalizado.
- Célula fotoeléctrica. Se activa o desactiva en función de la aportación de luz natural. Este último sistema es conceptualmente el más fiable, pero requiere un mantenimiento más frecuente para garantizar las condiciones de funcionamiento (para evitar el ensuciamiento y el envejecimiento de materiales, la obstaculización por parte del arbolado...). El sistema suele permitir el encendido y el apagado de instalaciones, pero no su regulación dependiendo del horario de utilización.
- Telegestión. Sistema óptimo, pues combina diferentes tecnologías y proporciona una operativa más adecuada a las necesidades.

Además del encendido y apagado, es muy frecuente que el tipo o la intensidad de utilización varíen en distintos períodos nocturnos. Por ejemplo: los niveles de iluminación necesarios en un campo deportivo son muy inferiores durante los entrenamientos que en una competición que sea retransmitida por televisión. Del mismo modo, las necesidades de iluminación de una zona urbana suelen reducirse cuando disminuye significativamente su densidad de uso. Los sistemas de regulación son de diferente tipología, en función de su principio físico y la fuente de luz que gobierne. Algunas de las tecnologías disponibles son:

- Apagada alternativa: Apagado de fuentes de luz no consecutivas, para reducir la energía consumida por la instalación. Este sistema no está permitido si reduce la uniformidad de la instalación.
- Regulador en cabecera. Limita la tensión de alimentación o frecuencia y/o forma de onda de alimentación de las luminarias, así como la salida del flujo luminoso.
- Hilo conductor. La regulación la realiza el equipo auxiliar, pero necesita un hilo o varios hilos, que transportan la información del momento en que se debe hacer la regulación.

-
- Sistemas auxiliares autorregulables. Reactancias electrónicas o mixtas, que son autoprogramables y se regulan en función de un algoritmo matemático del tiempo de encendido y apagado.

2.4 CL en proyectos de alumbrado.

2.4.1 Evaluación del Impacto Ambiental.

En la actualidad no existen modelos o evaluaciones de impacto ambiental lumínicos. Sólo se han encontrado dos aproximaciones, o demandas de información:

- Requerimientos reglamentarios o normativos: Por ejemplo, y es el último caso documentado, la Generalitat de Catalunya a través del anexo 1 del Proyecto de Decreto de desarrollo de la Ley de la Llei 6/2001 Proyecto (GENCAT 2014). Donde especifica el contenido de la memoria técnica que debe acompañar al proyecto de alumbrado y en el artículo 20.1 (Evaluación ambiental), dice literalmente:

“Los proyectos sometidos a la evaluación del impacto ambiental susceptibles de generar contaminación lumínica han de incluir en el estudio de impacto ambiental, la evaluación de la posible intrusión lumínica en el entorno y la proporción de flujo luminoso emitido por encima de la horizontal en los supuestos establecidos en el anexo 1”

- Estudios parciales: Algunos estudios de impacto ambiental, con medidas del foco contaminante, y como mucho cumplimiento de normativa, donde se ha determinado la magnitud contaminante de una determinada instalación, y se han medido algunos parámetros. En todo caso no con el objetivo de conseguir una forma metodológica para predecir el impacto ambiental global.

Por ejemplo, y centrándonos en la geografía catalana y madrileña, existen trabajos, informes y publicaciones en medidas y evaluación de foco contaminante. A modo exclusivamente de ejemplo se citan: Área Metropolitana de Barcelona (García Gil and Estrada García 2014), análisis de detalles con o sin medidas de fondo de cielo en municipios catalanes (Solano Lamphar 2010), análisis de contaminación lumínica a nivel de toda Catalunya (Torra and San Martín Páramo 2001), en la Comunidad Autónoma de Madrid (Gómez Castaño, Sánchez de Miguel et al. 2013), por satélite a varios países de la Unión Europea

(Beniie J., Davies T.W. et al. 2014), o en el Atlas de Cinzano, con carácter global (Cinzano, Falchi et al. 2001).

También existe alguna recomendación para mitigar la contaminación en alguna reserva especialmente problemática. Por ejemplo en las Galápagos (Ecuador 2008).

En todo caso, haciendo referencia a medidas de los efectos, o posibles evoluciones, pero no al impacto que el foco contaminante pudiera producir.

2.4.2 Reglamentación vigente.

La forma clásica de abordar el tema para la minimización la CL es el cumplimiento reglamentario. A continuación se trata este tema:

RECOPIACIÓN DE REGLAMENTACIONES:

A continuación, se enumeran algunas de las normativas, reglamentaciones y leyes que hacen referencia a la CL. Lejos de realizar un análisis exhaustivo, se pretende ofrecer una visión general de las diferentes tendencias y grados de protección.

Normativa nacional (España)	Reglamentación de las comunidades autónomas en España
Real Decreto 1890/2008	Protección de la Calidad Astronómica de los Observatorios del Instituto de Astrofísica de Canarias, Real Decreto 243/1992
	Protección del Medio Nocturno de las Islas Baleares, Ley 3/2005
	Reglamento de protección del medio nocturno, Decreto 82/2005 (derogado)
	Proyecto de reglamento de protección del medio nocturno en Catalunya (2014)
	Ordenación del Alumbrado para la Protección del Medio Nocturno de Navarra, Decreto Foral 199/2007
	Reglamento de contaminación lumínica de Cantabria, Decreto 48/2010
	Reglamento de contaminación lumínica de Andalucía, Decreto 357/2010
	Prevención de la contaminación lumínica de Castilla y León, Ley 15/2010

Tabla 2.2 Reglamentaciones sobre CL en España (García Gil, San Martín Paramo et al. 2012)

Además de las normativas mencionadas, también hacen referencia a la CL:

- Recomendaciones para la iluminación de rótulos y anuncios luminosos. Publicación CIE 1992: "Guía para iluminación de áreas urbanas"

- Recomendaciones para la iluminación de fachadas y monumentos. Publicación CIE 1994: "Guía para alumbrado con proyectores"
- Recomendaciones para las limitaciones de la luz intrusa. 6º Borrador (enero de 2001) del TC 5.12: Luz intrusa del CIE y el posterior CIE-150 2003 de recomendaciones para las limitaciones de la luz intrusa.

A parte de las normativas mencionadas, también hacen referencia a la CL a escala internacional:

- En el Reino Unido: artículo 102 ("Statutory nuisance: lighting") de la *Clean Neighbourhoods and Environment Act 2005*, consultable en la página web de la Oficina de Información del Sector Público.
- En Escocia: *Controlling Light Pollution and Reducing Lighting Energy Consumption*.

Normativa internacional	
Italia	Lombardía
República Checa	Ley de Protección de la Atmósfera, junio de 2002
Eslovenia	Agosto de 2007
Estados Unidos	Arizona, Arkansas, California, Colorado, Connecticut, Hawai, Maine, Michigan, Minnesota, Montana, Nuevo Méjico
Chile	Decreto 43. Norma de emisión para la regulación de la contaminación lumínica elaborada a partir de la revisión del Decreto nº 686 del 1998, del Ministerio de economía fomento y reconstrucción.

Tabla 2.3 Algunas reglamentaciones o normativas sobre CL en el mundo (García Gil, San Martín Paramo et al. 2012)

La mayoría de la normativa desarrollada tiene como origen la protección del cielo nocturno en la observación astronómica, y a menudo deja la protección de los ecosistemas naturales en un segundo plano.

ESTRUCTURA GENERAL:

A continuación se muestra la estructura general típica del articulado de un reglamento de CL: Zonificación, limitaciones en sistemas de alumbrado, y restricciones en niveles lumínicos de luz intrusa y gestión de instalaciones.

Los valores tomados de las diferentes fuentes son con carácter ilustrativo, y a modo de ejemplo sobre la divergencia de criterios al abordar la problemática. Por lo tanto, los diferentes grados de protección posibles. En ningún caso se ha buscado hacer un análisis exhaustivo de todas las reglamentaciones y posibilidades de articulado, puesto que no afecta al objetivo ni finalidad del trabajo.

Zonificación

Las diferentes zonas se clasifican en función de su protección contra la CL, según el tipo de actividad que se realiza en ellas. Esta zonificación permitirá establecer los valores de intensidad, dirección o rango espectral para cumplir la normativa en función de la zona donde se encuentre el caso de estudio.

Normalmente, se consideran cuatro zonas en función de su protección frente a la CL. El grado de mayor protección será para las zonas E1 y el de menor protección, para las zonas E4. Esta tipología se ha desarrollado en prácticamente todas las recomendaciones, publicaciones e incluso artículos existentes (García Gil and Sanyé 2001, CELMA 2007, MINISTERIO-DE-INDUSTRIA 2008, Cha, Lee et al. 2014, Chocho Ribas 2014, García Gil and Estrada García 2014, Novak 2014). :

Zonificación	Descripción
E1	Son las zonas más restrictivas, de máxima protección frente a la CL. Corresponden a las áreas coincidentes con los espacios de interés natural, las áreas de protección especial, zonas de protección de aves, observatorios astronómicos...
E2	Corresponden al suelo no urbanizable fuera de un espacio de interés natural, a las áreas de protección especial. Son las zonas periurbanas o los extrarradios de las ciudades.
E3	Son las áreas que el planeamiento urbanístico cualifica como suelo urbano o urbanizable. Son zonas residenciales donde la calzada, las vías de tráfico rodado y las aceras están iluminadas.
E4	Son áreas en suelo urbano de uso intensivo en actividades por la noche: vías comerciales, industriales o de servicios y también viales urbanos principales. Incluyen centros urbanos, zonas residenciales, sectores comerciales y de ocio con elevada actividad durante la franja horaria nocturna.

Tabla 2.4 Zonificación típica de las reglamentaciones de CL (García Gil, San Martín Paramo et al. 2012) y basado en la Norma CIE-150 (CIE 2003) y CIE-127 (CIE 1997)

El órgano de gobierno correspondiente publicará, difundirá y comunicará la zonificación de su territorio según la protección de la CL. En el caso del reglamento catalán, los

ayuntamientos pueden proponer modificaciones razonadas a la zonificación en sus términos municipales.

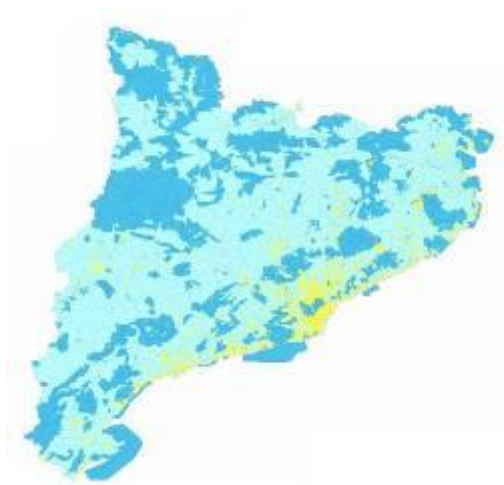


Figura 2.46 Mapa de zonificación de CL en Catalunya (GENCAT 2014)

Puede haber restricciones a la hora de poder establecer zonas E4 si hay una distancia mínima a una E1.

Pese a ello, no es una clasificación idónea, y a menudo se utiliza sólo por su pragmatismo. Para profundizar en detalle, el *Light Pollution Handbook* (Narisada and Schreuder 2004), propone clasificarlo de forma particularizada, en función de su necesidad específica:

Zonas ambientales	Ejemplo de subzona
E1	Áreas básicamente con paisajes oscuros
E1a	- Reservas naturales
E1b	- Parques nacionales
E1c	- Áreas de especial belleza y protección
E2	Áreas de bajo brillo: rurales, agricultura, residenciales.
E3	Áreas de brillo medio
E3a	- Áreas residenciales suburbanas
E3b	- Áreas residenciales urbanas
E4	Áreas de alto brillo
E4a	- Zonas urbanas con actividades residenciales, industriales... considerable actividad nocturna
E4b	- Ciudad y áreas metropolitana de uso recreacional con alta actividad nocturna

Tabla 2.5 Descripción de subzonas medioambientales. Traducción del autor a partir de la fuente (Narisada and Schreuder 2004)

<i>Zonas</i>	<i>Ejemplo de subzona</i>
E1	Áreas básicamente con paisajes oscuros
<i>E1a</i>	- <i>Observatorios de categoría mundial</i>
<i>E1b</i>	- <i>Observatorios internacionales o nacionales</i>
<i>E1c</i>	- <i>Observatorios de investigación académica de importante categoría</i>
E2	Observatorios de nivel para postgraduados
E3	Áreas de brillo medio
<i>E3a</i>	- <i>Observatorios amateurs importantes</i>
<i>E3b</i>	- <i>Observatorios amateurs recreacionales</i>
E4	Áreas de alto brillo
<i>E4a</i>	- <i>Visión de estrellas a simple vista</i>
<i>E4b</i>	- <i>Visión de estrellas a simple vista, de los astros más brillantes</i>

Tabla 2.6 Descripción de subzonas para actividades astronómicas. Traducción del autor a partir de la fuente (Narisada and Schreuder 2004)

Limitaciones en fuentes de luz:

Una vez realizada la zonificación, uno de los aspectos que debe tener en cuenta toda normativa es el espectro de emisión de las lámparas y su influencia en la CL. La iluminación de un emplazamiento ha de diseñarse, en lo que respeta a aparatos e instalaciones, de manera que prevengan la CL, y favorezcan el ahorro y el aprovechamiento de la energía.

Las lámparas que deben utilizarse son las de mayor eficiencia energética y de mínima emisión de flujo luminoso en radiaciones de longitud de onda inferiores a 440 nm, las cuales han de ser compatibles con las exigencias funcionales y paisajísticas de cada lugar.

Podemos ver, por ejemplo:

Real Decreto 1890/2008

En la zona E1, se utilizarán lámparas de vapor de sodio. Cuando no resulte posible utilizar dichas lámparas, se procederá a filtrar la radiación de longitudes de onda inferiores a 440 nm.

Reglamentación y proyecto en Catalunya:

Zona de protección	Horario tarde	Horario noche
E1	VSBP/VSAP	VSBP/VSAP
E2	Preferentemente VSBP/VSAP	VSBP/VSAP
E3	Preferentemente VSBP/VSAP	Preferentemente VSBP/VSAP
E4	Preferentemente VSBP/VSAP	Preferentemente VSBP/VSAP

VSAP: Lámparas de Vapor de Sodio a Alta Presión

VSBP: Lámparas de Vapor de Sodio a Baja Presión

Tabla 2.7 Limitaciones de lámparas en el D82/2005, derogado (GENCAT 2005)

En la extracción del articulado de la figura anterior, había limitaciones en lo que hace referencia a un uso demasiado directo de la tecnología. En el nuevo proyecto ese se salva de la siguiente forma:

Zona de protección	Horario tarde	Horario noche
E1	Tipo I	Tipo I
E2	Tipo II	Tipo I
E3 y E4	Tipo III	Tipo III

Tipo I: Lámparas que tengan menos del 2% de radiancia por debajo de 440 nm, dentro del rango comprendido entre 280 y 780 nm.

Tipo II: Lámparas que tengan menos del 10% de radiancia por debajo de 440 nm, dentro del rango comprendido entre 280 y 780 nm.

Tipo III: Lámparas que tengan menos del 15% de radiancia por debajo de 440 nm, dentro del rango comprendido entre 280 y 780 nm.

Tabla 2.8 Limitaciones de lámparas en el nuevo proyecto de reglamento de CL en (GENCAT 2014)

Decreto 357/2010, Andalucía

En zonas E1 y E2 adyacentes a E1, no se permitirán lámparas de emisión espectral superior al 15% por debajo de 440 nm.

Limitaciones en luminarias:

El factor típico referido a las luminarias es el F.H.S.i.. Han de limitarse las emisiones luminosas hacia el cielo en las instalaciones de alumbrado exterior, con la excepción de las de alumbrado festivo y navideño.

Real Decreto 1890/2008

Zona de protección	F.H.S.i. permitido
E1	≤1%
E2	≤5%
E3	≤15%
E4	≤25%

Tabla 2.9 Limitaciones para luminarias (MINISTERIO-DE-INDUSTRIA 2008).

Decreto 82/2005 y proyecto posterior, Cataluña

Zona de protección	F.H.S.i. permitido en horario tarde	F.H.S.i. permitido en horario noche
E1	≤1%	≤1%
E2	≤5%	≤1%
E3	≤15%	≤15%
E4	≤25%	≤25%

Tabla 2.10 Limitaciones de luminarias en el D82/2005, derogado (GENCAT 2005)

Zona de protección	F.H.S.i. permitido en horario tarde	F.H.S.i. permitido en horario noche
E1	≤1%	≤1%
E2	≤5%	≤1%
E3	≤10%	≤5%
E4	≤15%	≤15%

Tabla 2.11 Limitaciones para luminarias en proyecto de ley (GENCAT 2014)

Decreto 357/2010, Andalucía

En los proyectos, el F.H.S.i. será inferior o igual al 1%. Cuando esto no sea factible, deberá quedar justificado en los proyectos y, en ningún caso, se podrán superar los valores establecidos por la tabla.

Zona de protección	F.H.S.i. permitido
E1	≤1%
E2	≤5%
E3	≤15%
E4	≤15%
Alumbrado vial general	≤5%

Tabla 2.12 Limitaciones de luminarias en el D357/2010 (CONSEJERIA-DE-MEDIO-AMBIENTE 2010)

Restricciones en niveles lumínicos para luz intrusa:

A partir de este punto, las normativas establecen unos criterios más o menos restrictivos para limitar los niveles de iluminación media en las diferentes vías, el deslumbramiento máximo... Para iluminaciones no funcionales, dependiendo de la zona de protección: iluminación intrusa máxima en superficies verticales, luminancias máximas de fachadas...

Real Decreto 1890/2008

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
Iluminancia vertical (Ev)	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 (Lm)	5 cd/m ²	5 cd/m ²	10 cd/m ²	25 cd/m ²
Luminancia máxima de las fachadas (Lmax)	10 cd/m ²	10 cd/m ²	60 cd/m ²	150 cd/m ²
Luminancia máxima de señales y anuncios luminosos (Lmáx)	50 cd/m ²	400 cd/m ²	800 cd/m ²	1.000 cd/m ²
Incremento de umbral de contraste (TI)	Clase de Alumbrado			
	Sin iluminación	ME 5	ME3 / ME4	ME1 / ME2
	TI = 15% para adaptación a L = 0,1 cd/m ²	TI = 15% para adaptación a L = 1 cd/m ²	TI = 15% para adaptación a L = 2 cd/m ²	TI = 15% para adaptación a L = 5 cd/m ²

Tabla 2.13 Limitaciones luz intrusa (MINISTERIO-DE-INDUSTRIA 2008).

Decreto 82/2005 (derogado), Cataluña

La iluminación producida por un proyector debe cumplir los siguientes requisitos:

El haz luminoso de un proyector debe limitarse a la superficie a iluminar. La intensidad luminosa fuera de la superficie a iluminar debe ser inferior a 10 candelas por cada kilolumen emitido por la lámpara. Deben respetarse los valores de iluminación intrusa establecidos en la tabla 5 y las intensidades lumínicas de la tabla 7.

Zona de protección	Máxima intensidad luminosa hacia zonas protegidas E1 en horario tarde	F.H.S.i. permitido en horario noche
E2	50 kcd	0,5 kcd
E3	100 kcd	1 kcd
E4	100 kcd	2,5 kcd

Tabla 2.14 Limitaciones de luz intrusa a zonas naturales en el D82/2005, derogado (GENCAT 2005)

Zona de protección	Máxima iluminancia en superficie vertical	F.H.S.i. permitido en horario noche
E1	2 lx	1 lx
E2	5 lx	2 lx
E3	10 lx	5 lx
E4	25 lx	10 lx

Tabla 2.15 Limitaciones de luz intrusa a viviendas en el D82/2005, derogado (GENCAT 2005)

La iluminación que recibe una fachada de un edificio por encima de 4,5 metros, producida por el alumbrado de la calle, será, como máximo, los valores de iluminación que aparecen en la tabla 5 según la zona de protección donde esté ubicado el alumbrado.

La intensidad lumínica de cualquier luz que emita flujo lumínico en dirección a áreas protegidas (E1) o pueda provocar deslumbramiento a personas no ha de superar los valores de la tabla 7.

2.4.3 Un caso particular. El reglamento de Chile.

Un caso especial de análisis es el Reglamento chileno. Este ha sido uno de los últimos desarrollados y con más ahínco en la protección, debido a que tiene entre otras importantes finalidades, proteger el cielo oscuro de los observatorios astronómicos más prestigiosos del mundo: los del desierto de Antofagasta, Atacama y Coquimbo. Unas

breves reseñas en el carácter protector de este reglamento (Decreto 43/2013 del 3 de mayo de 2013. (MINISTERIO-DE-MEDIO-AMBIENTE 2013)):

- Existen limitaciones para instalaciones que en otras reglamentaciones están totalmente exentas (como balizamientos)
- Para luminarias, ya no se refiere al F.H.S.i., si no directamente a la máxima intensidad luminosa permitida. En el artículo 6 menciona:

1. Una distribución de intensidad luminosa máxima, para un ángulo gama igual a 90°, que esté comprendida entre 0,00 y 0,49 candelas por cada 1.000 lúmenes del flujo de la lámpara.

2. Una distribución de intensidad luminosa de 0 candelas, para un ángulo gama mayores a 90°, por cada 1.000 lúmenes del flujo de la lámpara.

3. En el caso del alumbrado deportivo y recreacional, el límite de intensidad luminosa máxima será de 10 candelas por cada 1.000 lúmenes del flujo de la lámpara, a un ángulo gama de 90°, junto con la adición de una visera que limite la emisión hacia el hemisferio superior. Dicha visera o paralumen deberá presentar un área similar a la de la superficie emisora del reflector, a objeto de cubrir efectivamente el plano superior del proyector o luminaria.

- En el caso de limitaciones de lámparas hace exclusivamente referencias a los rangos espectrales, y según el artículo 7:

1. La radiancia espectral entre 300 nm y 379 nm no podrá superar el 15% de la radiancia espectral entre 380 nm y 780 nm.

2. La radiancia espectral entre 380 nm y 499 nm no podrá superar el 15% de la radiancia espectral entre 380 nm y 780 nm.

3. La radiancia espectral entre 781 nm y 1 micra no podrá superar el 50% de la radiancia espectral entre 380 nm y 780 nm.

- Limita el coeficiente de reflexión de las calzadas.
- Da una limitación global a todos los carteles, avisos, y letreros.

Todo ello para la zona más importante del país, la que es objeto de protección (Antofagasta, Atacama y Coquimbo).

2.5 Conclusiones del apartado.

En el presente apartado se ha abordado el aspecto más cualitativo y conceptual de la CL. La tipología de entornos sensibles que pueden verse afectados por esta problemática se han definido en un total de 3: Ecosistema natural, ser humano (su salud) y brillo del cielo nocturno. El conocimiento actual de la problemática está en fase de expansión y empezando a llegar a etapas de madurez. Se esperan grandes avances, sobre todo en la relación a la salud humana y repercusiones medioambientales.

La fuente contaminante o emisor de radiación luminosa, es la instalación de alumbrado. En gran parte se trata de las instalaciones de alumbrado público de calles, carreteras, etc. El control de su repercusión se realiza actualmente mediante las normativas y reglamentos vigentes en cada territorio.

Actualmente esta protección es insuficiente:

- Debido a que en su mayoría se hace uso de normativas obsoletas, y que no incluyen las últimas tecnologías en alumbrado (como los LED).
- Por el desconocimiento de todas las repercusiones en el ecosistema natural, y en los seres vivos en particular.
- Por la extensión territorial de las repercusiones y su incremento, origina que la protección de un territorio sea insuficiente, debido al impacto que pueden sufrir de espacios vecinos, hasta a más de 100 km, y ocasionando una "erosión" constante del ecosistema natural nocturno(Gaston, Duffy et al. 2015).
- En general, las reglamentaciones no hacen en ningún caso referencia a repercusiones ni afectaciones medioambientales, dejando el ecosistema natural más sensible, indefenso.

3. CUANTIFICACIÓN DE LA CL.

μηδὲν ἄγαν

Oráculo de Delfos (VI a. C.)

mêdén ágan

Ramón San Martín (2012 d.C.)



3. CUANTIFICACIÓN DE LA CL

3.1 Cuantificación sobre ecosistemas naturales.

Como se ha visto en el apartado 2.2.1. Sobre el ecosistema natural, las repercusiones de la luz sobre esos entornos son numerosas. La forma de cuantificarlas varía en función del ecosistema y sobre todo de la especie concreta a analizar.

Actualmente el estudio de la técnica de estas repercusiones es insuficiente para dar una imagen general, pero se ha avanzado mucho desde las primeras publicaciones completas de Longcore y Rich (Longcore 2004, Rich and Longcore 2006). Quizás la recopilación más importante la realizó Kevin J. Gaston en el año 2013 (Gaston, Davies et al. 2012). El conocimiento de la sensibilidad de los seres vivos a la luz se conoce desde hace décadas:

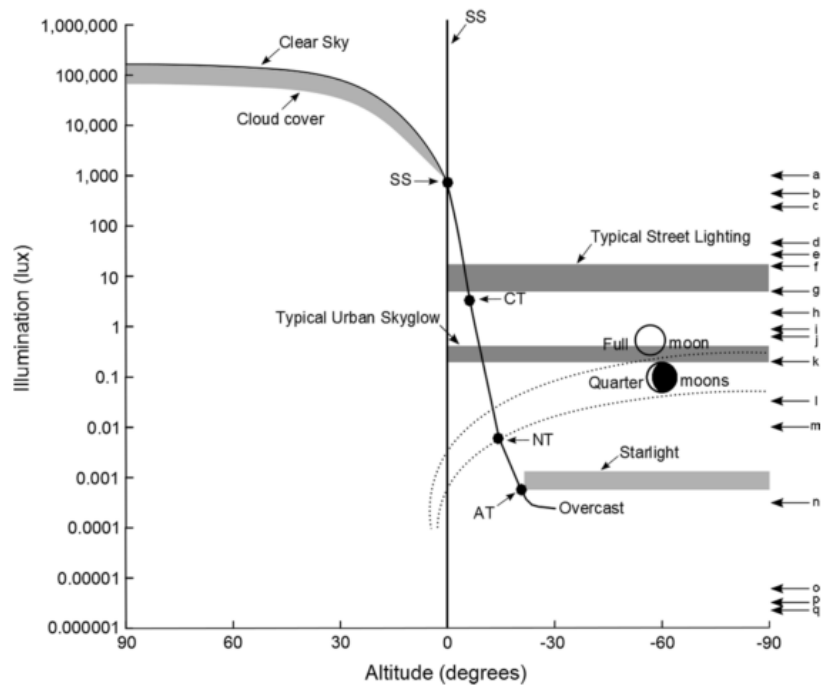


Figura 3.1 Niveles lumínicos naturales y referencia de algunos efectos naturales a la derecha con flechas (Gaston, Duffy et al. 2014)

Tabla de valores umbral de lumínicos observados, y que los relaciona con los efectos biológicos:

Table 3. Examples of the levels at which nighttime lighting has been observed to have biological effects

Species	Setting	Effect	Nighttime lighting	Source
Barred owl <i>Strix varia</i>	Lab	Location of prey	1.6×10^{-6} lux*	Dice (1945)
Long eared owl <i>Asia wilsonianus</i>	...	...	2.7×10^{-6} lux*	...
Barn owl <i>Tyto alba</i>	...	...	5.7×10^{-6} lux*	...
Burrowing owl <i>Speotyto cunicaria</i>	...	...	2.8×10^{-4} lux*	...
Common toad <i>Bufo bufo</i>	Lab	Increased prey detection	2.8×10^{-4} lux (constant)	Larsen & Pedersen (1982)
Syrian hamster <i>Mesocricetus auratus</i>	Lab	Altered circadian rhythm	0.01 lux (constant)	Evans <i>et al.</i> (2007a)
Salmon <i>Salmo salar</i>	Lab	Increased prey detection	0.01–5 lux (constant)	Metcalf <i>et al.</i> (1997)
Fruitfly <i>Drosophila melanogaster</i>	Lab	Increased activity levels and shifted typical morning and evening activity peaks into night	0.03 lux (constant)	Bachleitner <i>et al.</i> (2007)
Brown rat <i>Rattus norvegicus</i>	Lab	Increased rates of tumor growth and metabolism	0.2 lux (constant)	Dauchy <i>et al.</i> (1997)
Brown rat <i>Rattus norvegicus</i>	Lab	Increased rate of tumor growth	0.21 lux (constant)	Cos <i>et al.</i> (2006)
Ringed plover <i>Charadrius hiaticula</i>	Field experiment	Higher prey intake	0.74 lux (constant)	Santos <i>et al.</i> (2010)
Kentish plover <i>Charadrius alexandrinus</i>	...	...	...	...
Grey plover <i>Pluvialis squatarola</i>	...	...	...	...
Dunlin <i>Calidris alpina</i>	...	...	...	...
Redshank <i>Tringa totanus</i>	...	...	...	...
Deer mouse <i>Peromyscus maniculatus</i>	Lab	Reduced nocturnal activity	0.93 lux (constant)	Falkenberg & Clarke (1998)
Prairie Rattlesnake <i>Crotalus viridis</i>	Lab	Reduced activity	1 lux	Clarke <i>et al.</i> (1996)
American robin <i>Turdus migratorius</i>	Field observations	Earlier initiation of singing	Mean 1.26 lux (range 0.05–3.06 lux; constant)	Miller (2006)
Leaf-eared mouse <i>Phyllotis xanthopygus</i>	Lab	Reduced nocturnal activity	1.5 lux (constant)	Kramer & Birney (2001)
Leaf-eared mouse <i>Phyllotis darwini</i>	Lab	Predator avoidance and reduced food consumption	< 2.0 lux (constant)	Vasquez (1994)
Siberian hamster <i>Phodopus sungorus</i>	Lab	Suppressed immune response	5 lux (constant)	Bedrosian <i>et al.</i> (2011b)
Green and blue-green algae	Field observations	Minimum artificial light required for continued photosynthetic growth in caves	10–50 lux 50–180 lux 250 lux	Johnson (1979)
Ferns	...	...	...	...
Atlantic salmon <i>Salmo salar</i>	Field experiment	Altered timing of nocturnal migration	14 lux (constant; measured at stream surface)	Riley <i>et al.</i> (2012)
Pond bats <i>Myotis dasycneme</i>	Field observations	Reduced feeding rate, disturbed flight pattern	< 30 lux (constant)	Kuijper <i>et al.</i> (2008)
Lesser horseshoe bats <i>Rhinolophus hipposideros</i>	Field experiment	Reduced activity, onset of commuting delayed	51.67 lux (average; constant)	Stone <i>et al.</i> (2009)
Social vole <i>Microtus socialis</i>	Lab	Disruption of seasonal acclimatization of thermoregulation	450 lux (15 min pulse)	Zubidat <i>et al.</i> (2007)
Field mouse <i>Mus booduga</i>	Lab	Disruption of circadian rhythm	1000 lux (15 min pulse)	Sharma <i>et al.</i> (1997)

*Converted from reported values in foot candles.

Note that: (i) in many cases these represent levels of experimental treatments, and precisely where thresholds might lie remains unknown; and (ii) although widely used, lux measurement places emphasis on brightness at wavelengths perceived by human vision. Studies are ordered in increasing intensity of light.

Tabla 3.1 Tabla 3 del artículo sobre efectos de ciertos niveles lumínicos en animales (Gaston, Bennie *et al.* 2013)

La luz durante la noche es de unas características muy diferente a la diurna. La luz de la Luna es sensiblemente diferente a la de las fuentes de luz:

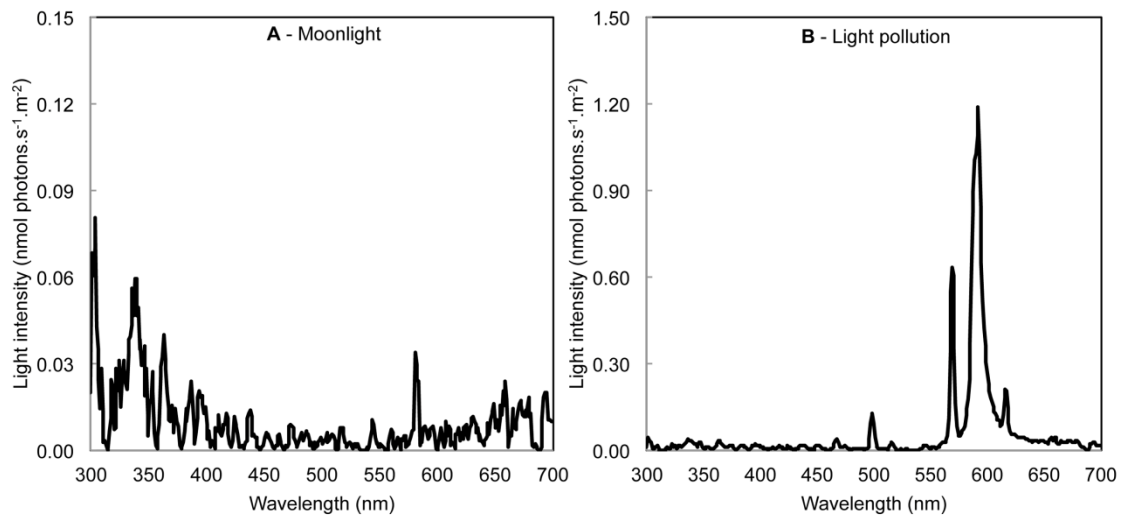


Figura 3.2 Diferencias de emisión espectral de la luz de la Luna y un ejemplo de iluminación nocturna artificial (Le Tallec, Perret et al. 2013)

Actualmente no existen metodologías, modelos o protocolos matemáticos para evaluar de forma generalizada la repercusión del nivel lumínico sobre ecosistemas. A partir de la bibliografía analizada, se presentan los niveles lumínicos umbral para la afectación a determinados seres a modo similar como la presenta Kevin J. Gaston en la figura Tabla 3.1. Se ha considerado como valor inferior para análisis los 0,01 lx. Valor a partir del cual se puede medir con facilidad con un luxómetro clase A según la norma DIN 5032-7. Este valor está condicionado por la tecnología, y conocimiento en el proyecto luminotécnico, pero es claramente limitante y perjudicial para las especies nocturnas que más sensibles son a la presencia de luz artificial. La determinación de este valor debe estudiarse detenidamente en situaciones posteriores para poder evaluarlo en casos de especial sensibilidad. La tabla extendida, que recopila todos los niveles de la bibliografía se puede consultar en el Anexo C.

Merece la pena tener en cuenta que para los seres vivos de comportamiento más nocturno (ya sean insectos, predadores, etc.), una mínima porción de luz (a menudo inferior al valor del nivel lumínico de la luna llena), ya ocasiona repercusiones negativas.

Todo y no tener información de detalle del espectro de emisión, merece la pena considerar que de forma mayoritaria, hay mayores repercusiones para radiaciones de onda corta. Incluso en luz visible, de forma que pudiera ser utilizado como insecticida debido a su letalidad (Hori, Shibuya et al. 2014).

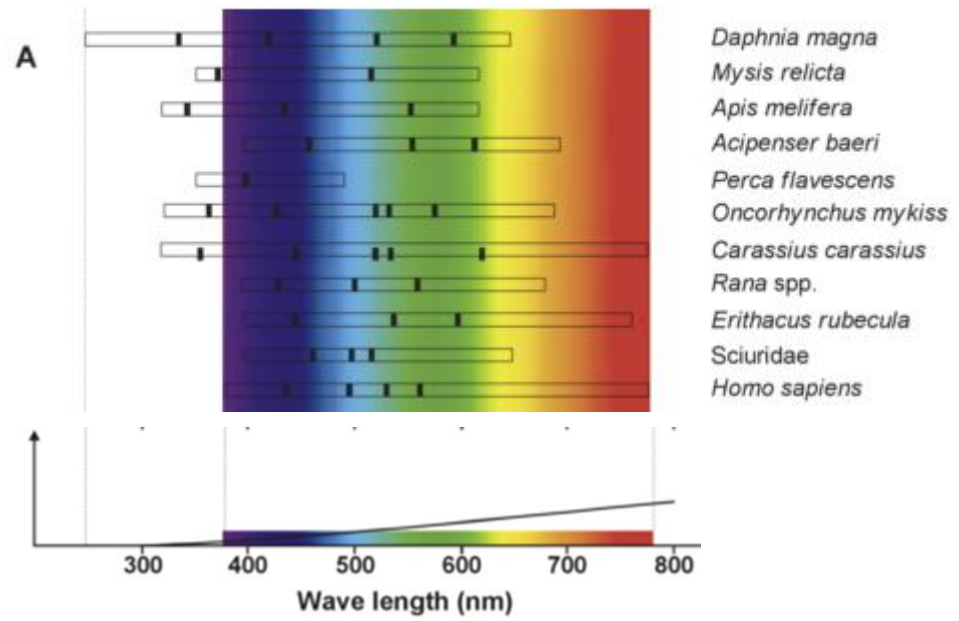


Figura 3.3 Diferentes tipos de visión de varios seres vivos (Perkin, Hölker et al. 2011)

Hay aceptación en la comunidad científica para considerar que los lúmenes medidos para la afectación medio ambiental al ecosistema y animales nocturnos, tengan la sensibilidad de lo que se considera visión escotópica en el ser humano (Aubé, Roby et al. 2013) (Bessolaz 2009).

3.2 Cuantificación en la salud humana.

Como se mencionó en apartados anteriores, la repercusión más estudiada es la falta de salud o riesgo para el organismo debido a los efectos que la luz. Estos efectos son debidos a la reducción de la melatonina y falta de sincronía en los ciclos circadianos.

Existe pues, un riesgo potencial de repercusiones negativas en el organismo humano (igual que en otros animales), en función la disminución de esta hormona. En la actualidad hay dos modelos y publicaciones de referencia que se usan para cuantificar la reducción de la melatonina en función de la irradiación lumínica sobre el ojo humano. Estos son:

3.2.1 Modelo de Yang Meng.

El método desarrollado (Meng, He et al. 2011) es una aproximación fisiológica a partir de los diferentes factores que influyen en la modificación de melatonina y ofrecen una forma de modelizar la concentración de melatonina en sangre y saliva.

El modelo parte de la influencia tanto positiva como negativa de la luz en los diferentes receptores y su afectación a la melatonina.

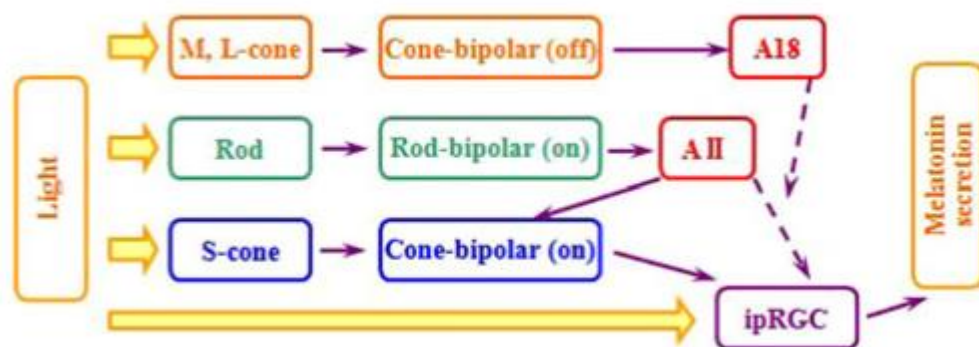


Figura 3.4 Caminos sinérgicos de conos/bastones y ipRGCs. La línea continua indica efecto positivo y la discontinua efecto negativo (Meng, He et al. 2011).

En modelo caracteriza la señal de los recetores por la ley de Michaelis-Menten y la respuesta por la ley de Weber-Fechner. La resultante es:

$$MS = k \cdot \lg \left(\frac{V_{ip} + V_r + V_{sc}}{\sigma_{MS} + V_{r-}} \right) \quad \text{para } V_{ip} + V_{r+} + V_{sc} \geq \sigma_{MS} + V_{r-}$$

$$MS = 0 \quad \text{para } V_{ip} + V_{r+} + V_{sc} < \sigma_{MS} + V_{r-} \quad \text{Fórmula 3.1}$$

Donde:

Donde:

MS : es el porcentaje de reducción de la concentración de la melatonina en sangre.

k: Constante experimental que debe ser medida.

V_{ip} : Señal excitadora debido a las células ipRGCs.

V_{r+} : Señal excitadora debido a las ipRGCs actuando sobre los bastones.

V_{sc} : Señal excitadora debido a las ipRGCs actuando sobre los conos S.

V_r : Señal inhibidora debido a los bastones.

σ_{MS} : Umbral de estímulo para las células ipRGCs.

3.2.2 Modelos del equipo de Mark S. Rea.

Los estudios de Mark S. Rea se remontan a finales del siglo pasado e inicios del presente. Incluso antes de que descubrieran las células ipRGCs (Rea, Bullough et al. 2001, Thapan, Arendt et al. 2001), el autor detectó ciertas supresiones de melatonina debido a luz fría en lugar de cálida y la relacionó con la visión escotópica (Rea, Bullough et al. 2001).

Es pero en el año 2005, cuando se publica un modelo para analizar el descenso de melatonina en función de parámetros luminotécnicos, y la experimentación (es decir, es un modelo experimental) (Rea, Figueiro et al. 2005):

$$CS = \left[\left(a_1 \cdot \int M_\lambda \cdot P_\lambda \cdot d\lambda - b_1 \right) \triangleleft a_2 \cdot \left(\int S_\lambda \cdot P_\lambda \cdot d\lambda - k \cdot \int V_{10\lambda} \cdot P_\lambda \cdot d\lambda \right) - b_2 \right] - a_3$$
$$\cdot \left(1 - e^{-\frac{\int V'_\lambda \cdot P_\lambda \cdot d\lambda}{rodSat}} \right) \quad \text{para} \quad \int S_\lambda \cdot P_\lambda \cdot d\lambda - k \cdot \int V_{10\lambda} \cdot P_\lambda \cdot d\lambda \geq 0$$
$$CS = \left[\left(a_1 \cdot \int M_\lambda \cdot P_\lambda \cdot d\lambda - b_1 \right) \right] \quad \text{para} \quad \int S_\lambda \cdot P_\lambda \cdot d\lambda - k \cdot \int V_{10\lambda} \cdot P_\lambda \cdot d\lambda < 0$$

Fórmula 3.2

Donde:

\triangleleft : es un operador matemático

M_λ : Sensibilidad espectral de la célula ipRGC

$V_{10\lambda}$: Sensibilidad espectral de los conos L+M.

V'_λ : Sensibilidad espectral de los bastones

S'_λ : Sensibilidad espectral de los conos

P_λ : Radiancia en el ojo humano (W/m²/nm)

Parámetros que representan la interacción de los fotorreceptores:

$$K=0,31$$

$$a_1= 0,285$$

$$a_2=0,2$$

$$a_3= 0,72$$

Constantes: representan los umbrales de los fotorreceptores:

$$b_1=0,01$$

$$b_2=0,001$$

$$\text{rodSat}=6,5$$

CS: Estimulo circadiano, en unidades de espectro circadiano.

De forma que a partir del valor CS y obtenido al integrar los espectros de emisión P_λ en todas sus diferentes células sensibles, tendríamos un descenso de la concentración de melatonina esperada según la siguiente gráfica:

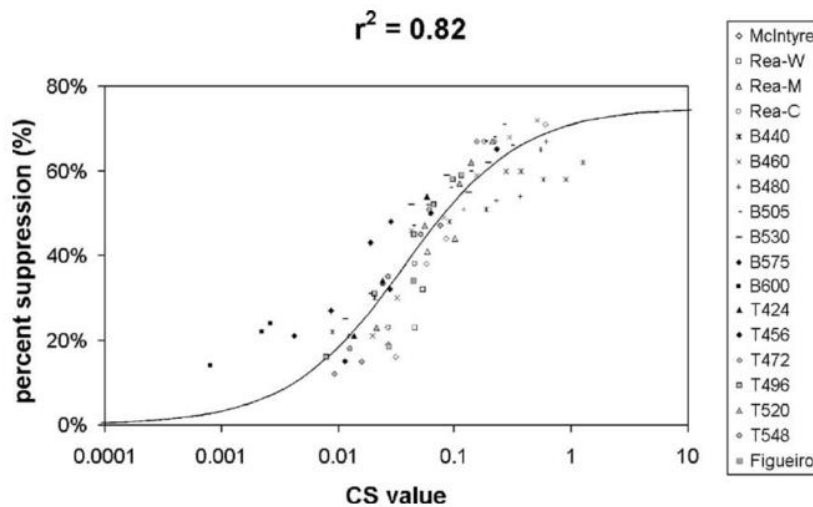


Figura 3.5 Supresión de melatonina en función de diferentes fuentes experimentales realizadas (Rea, Figueiro et al. 2005)

El autor de este modelo y su equipo proporcionan una forma rápida y un ejemplo de aplicación para su fácil utilización (Rea, Figueiro et al. 2010).

En el año 2012 se produjo una reformulación del modelo, por el mismo equipo de investigadores, teniendo en cuenta: La transmitancia espectral de las lentes, para incluirlas en la sensibilidad espectral de las células IPRGCs; la transmitancia de la macula; y también se usa nueva enumeración de constantes y su formulación es más intuitiva desde el punto de vista de la fisiología del ojo humano. El nuevo modelo es:

$$CL_A = 1548 \cdot \left[\int M_{C\lambda} \cdot E_\lambda \cdot d\lambda + \left(a_{b-y} \cdot \left(\int \frac{S_\lambda}{mp\lambda} \cdot E_\lambda \cdot d\lambda - k \cdot \int \frac{V_\lambda}{mp\lambda} \cdot E_\lambda \cdot d\lambda \right) - a_{rod} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\int V'_\lambda \cdot E_\lambda \cdot d\lambda}{RodSat}} \right) \right) \right] \text{ para } \int \frac{S_\lambda}{mp\lambda} \cdot E_\lambda \cdot d\lambda - k \cdot \int \frac{V_\lambda}{mp\lambda} \cdot E_\lambda \cdot d\lambda \geq 0$$

$$CL_A = 1548 \cdot \left(\int M_{C\lambda} \cdot E_\lambda \cdot d\lambda \right) \text{ para } \int \frac{S_\lambda}{mp\lambda} \cdot E_\lambda \cdot d\lambda - k \cdot \int \frac{V_\lambda}{mp\lambda} \cdot E_\lambda \cdot d\lambda < 0$$

Fórmula 3.3

Donde:

CL_A: Luz circadiana. La constante 1548 es para normalizar este valor y equiparlo a los luxes fotopícos.

M_{Cλ}: Sensibilidad espectral de la melanopsina corregida por la transmitancia del cristalino.

E_λ: Radiancia en el ojo humano (W/m²/nm)

S_λ: Sensibilidad espectral de los conos S.

V'_λ: Sensibilidad espectral para la visión escotópica.

V_λ: Sensibilidad espectral para la visión fotópica.

mpλ: Transmitancia del pigmento de la macula

Parámetros que representan la interacción de los fotorreceptores:

$$k=0,2613$$

$$a_{b-y}= 0,7$$

$$a_{rod}=3,3000$$

$$rodSat=6,5$$

Y valor la fracción de disminución de melatonina CS (Circadian Stimulus):

$$CS = 0,7 \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{CL_A}{355,7} \right)^{1,1026}} \right) \quad \text{Fórmula 3.4}$$

Donde:

CL_A: Luz circadiana. La constante 1548 es para normalizar este valor y equiparlo a los luxes estándares.

CS: Estimulo circadiano. Da la fracción de reducción de nivel de melatonina en sangre esperada. El valor es entre 0 – 0,7 (representa el 0 % y el 70%).

Este se enuncia teniendo en cuenta los últimos artículos publicados y mails privados con el autor (Rea MS, Figueiro MG et al. 2012, Rea, Figueiro et al. 2012, Rea MS and Figueiro MG 2013).

3.2.3 La problemática de la medida.

La existencia de las diferentes células sensibles y sus interrelaciones crean diferentes problemáticas. Una de ellas, como barrera a resolver por la investigación y aplicación posterior, viene relacionada con la sensibilidad de cada célula, y la luz que incide sobre la retina. En particular: cómo medir y en qué unidades la radiación sobre cada célula. En base a ello, en 2013 se realizó un workshop de expertos en el tema, del que surgieron algunos artículos (Lucas 2013), y el CIE ha recogido en una nota técnica (CIE 2015). En estos documentos se pone de manifiesto la insuficiencia de poder medir la influencia de poder medir radiación sobre el ojo humano en luxes y caracterizar el espectro de emisión solamente mediante la temperatura de color de la luz. Por otra parte, se proporcionan sensibilidades de las diferentes células fotosensibles del ojo, así como una forma de poder determinar su influencia en el sistema visual y no visual del ojo humano.

Esta publicación es muy importante para basar criterios comunes a la hora de poder desarrollar trabajos futuros, a la vez que permite cuantificar de forma más precisa la afectación radiada sobre el ojo humano (inputs a los fotorreceptores), y poder predecir sus implicaciones en el proceso de ciclo circadiano.

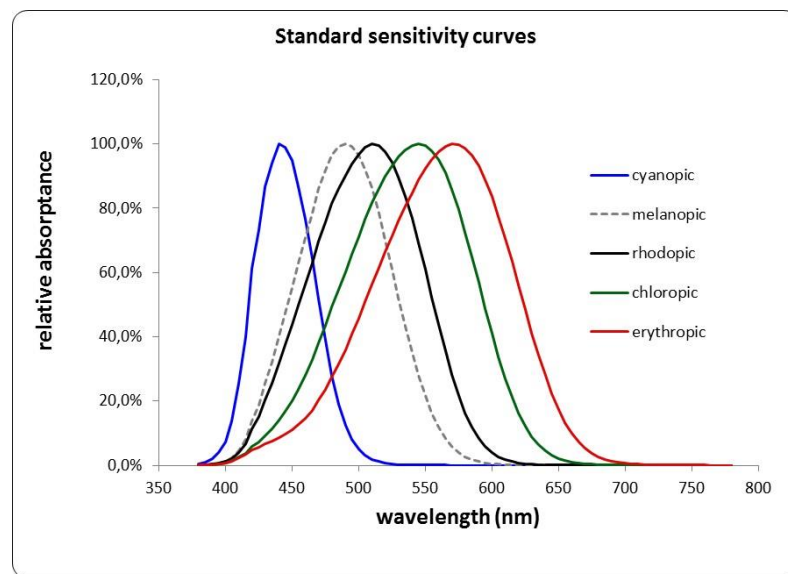


Figura 3.6 Curvas de sensibilidad estándares de cada fotopigmento (CIE 2015)

Como herramienta práctica para investigadores, el CIE publicó una herramienta para poder realizar cálculos rápidos en función de la irradiación incidente.

3.3 Cuantificación en el resplandor del cielo.

La localización para realizar observaciones astronómicas, ha sido una preocupación para los científicos desde los años 70. Los modelos de cálculo de CL en función de la localización y los focos de contaminación existen desde entonces, y tienen como objetivo cuantificar el resplandor luminoso del cielo nocturno. A continuación se enumeran algunos:

3.3.1 Modelo de Walker.

El primero en trabajar en ello fue Walker (años 70) (Walker 1976, Walker 1977, Garstang 1986). La fórmula y variables que consideró fueron las siguientes:

$$I = C \cdot P \cdot d^{-2,5} \qquad \text{Fórmula 3.5}$$

Donde:

I= Índice de CL.

C=Constante (estimación de flujo lumínico por habitante de una población en lúmenes/habitante).

P=Población en habitantes de una población.

d=Distancia en kilómetros.

Él consideró como variable para determinar el foco contaminante la población de una ciudad y su posible relación con el entorno. La constante C, se utiliza a veces como 1000 lúmenes/habitante, como una aproximación. Además de su distancia de la ciudad al observador.

La utilidad de este método se basa sobre todo a la posibilidad de localizar observatorios futuros, para observaciones astronómicas y se considera la dispersión de la atmósfera proporcional a la inversa de la distancia elevado a 2,5, no a 2. Este valor se puede considerar debido a la absorción de la atmósfera (Narisada and Schreuder 2004).

3.3.2 Modelo de Treanor.

El modelo posterior fue el de Treanor 1973. Lo mejoró teniendo en cuenta la extinción en la atmosfera de los aerosoles y la distancia del observador al punto de visión y de la ciudad al punto de reflexión.

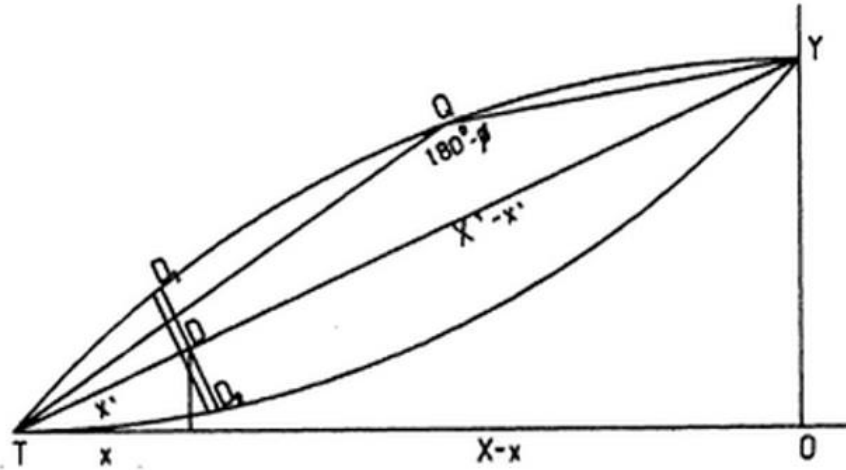


Figura 3.7 Esquema de cómo se calculan las distancias hacia el punto de observación según el modelo de (Treanor 1973)

La fórmula de cálculo es:

$$I_o = a \cdot P \cdot \left(\frac{A}{X} + \frac{B}{X^2} \right)^{-k \cdot X} \quad \text{Fórmula 3.6}$$

Donde:

I_o = brillo artificial en el cénit del cielo

P = Población de la ciudad de estudio en unidades de 10^5 habitantes

A , B y k = constantes experimentales

X = distancia a la ciudad en kilómetros.

a = parámetro que refleja el desarrollo urbano de la ciudad

3.3.3 Modelo de Garstang.

En los años 70 se produjeron otros modelos, teniendo en cuenta pequeñas ciudades (Berry 1973), o para zonas más grandes y modelos que pudieran incluirse en procesos informáticos (Pike 1976). Consideraban las ciudades como puntos y como los anteriores, las ciudades tenían parámetros bastante fijos de flujo lumínico emitido.

Un punto de inflexión importante lo facilitó (Garstang 1986) con el siguiente modelo:

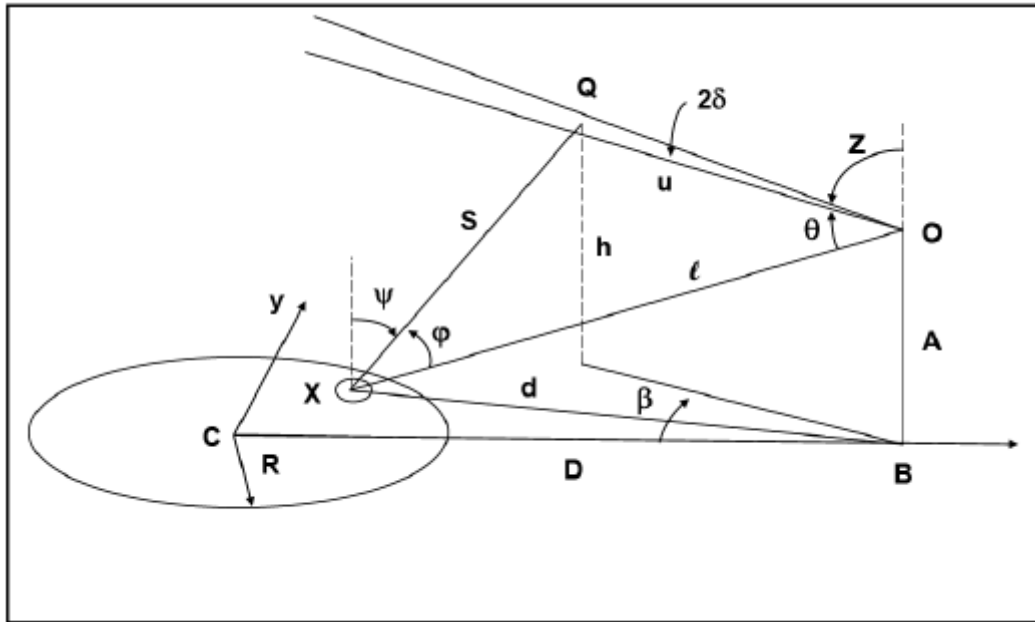


Figura 3.8 Esquema de cómo se calculan las distancias hacia el punto de observación según el modelo de Garstang (Garstang 1986)

La fórmula del modelo de Garstang se muestra a continuación (Garstang 1991) :

$$I = a \cdot P \cdot U \cdot D^{-2} \cdot (DS) \cdot (EF)$$

Fórmula 3.7

Donde:

- I= Brillo artificial en el cénit del cielo.
- a = constante relacionada con la población.
- U=Constante de lúmenes emitidos a la atmósfera por habitante.
- P=Población de la ciudad.
- D=Distancia a la ciudad en kilómetros.
- DS= Dispersión entre ciudad y atmósfera.
- EF=Factor de extinción.

Modelo que se basa en la determinación de un parámetro luminotécnico (Luminancia de fondo de cielo), y considerando partículas en suspensión aunque todavía sin considerar las nubes. Pese a ello, todavía consideraba la emisión del foco contaminante como proporcional a la población de la ciudad, no en función de las características de esta (de urbanización e instalaciones, dejándolo a costa de la variable experimental a).

3.3.4 Modelo de Albers y Duriscoe.

Pasados los años, no fue hasta 2001 cuando hubo una nueva propuesta, que tuvo en cuenta los factores climáticos y partículas en suspensión. El modelo (Albers and Duriscoe 2001) también tenía en cuenta el número de habitantes para determinar el cálculo de flujo contaminante, una mejora para el cálculo a grandes distancias.

$$I = 11300000 \cdot p \cdot r^{-2,5} \qquad \text{Fórmula 3.8}$$

Donde:

I= Brillo del cielo en Nanolamberts.

P=Población de la ciudad en habitantes.

r= Distancia a la ciudad en metros.

Una carencia respecto a la atmósfera es que da datos fijos para la extinción atmosférica, pero su sencillez permitió elaborar los primeros mapas de CL:

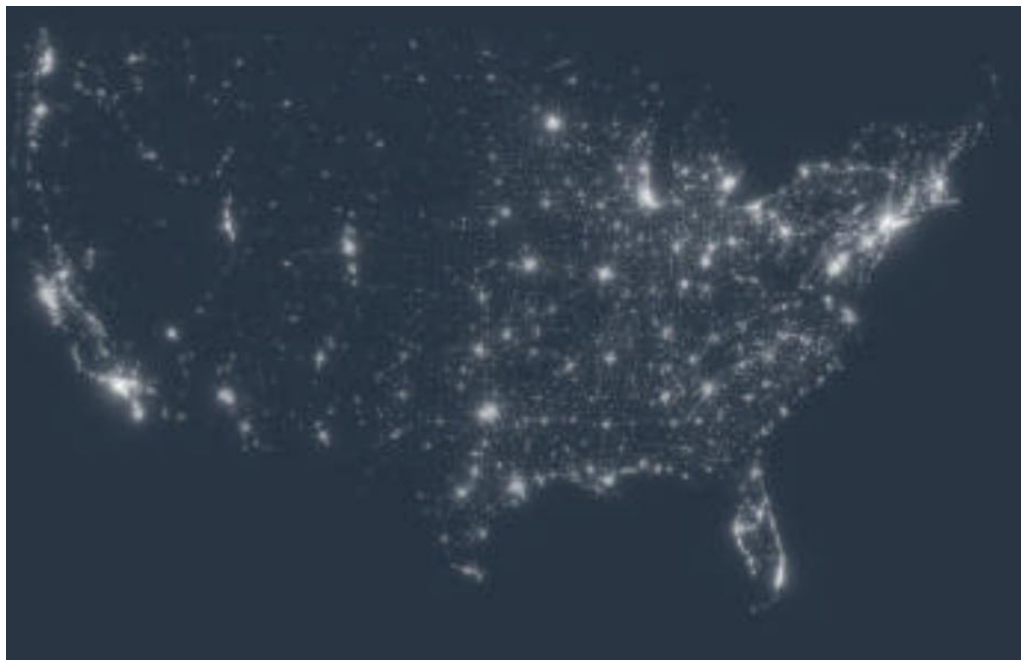


Figura 3.9 Mapa de CL según modelo (Albers and Duriscoe 2001)

3.3.5 Primer Atlas de CL: Cinzano, Falchi y Elvidge .

Se presentó en 2001 "The first world atlas of artificial night sky brightness" (Cinzano, Falchi et al. 2001). Éste se obtuvo a través de datos de alta resolución por satélite, y un modelado de la propagación de la luz en la atmósfera.; de forma que se pudo mostrar un mapa de CL en todo el planeta.

El modelo se basó en el uso de técnicas de medida del satélite DMSP. Éste, vuela a una órbita de 830 km con un periodo de 101 minutos. Las observaciones se realizaron con una sensibilidad de 0,2 mcd/m² y realizaron unas consideraciones de flujo contaminante de las ciudades, en función de su población y brillo, y técnica de algoritmos anteriores (Garstang 1986, Narisada and Schreuder 2004)

Y consigue imágenes como las que a continuación se proponen:

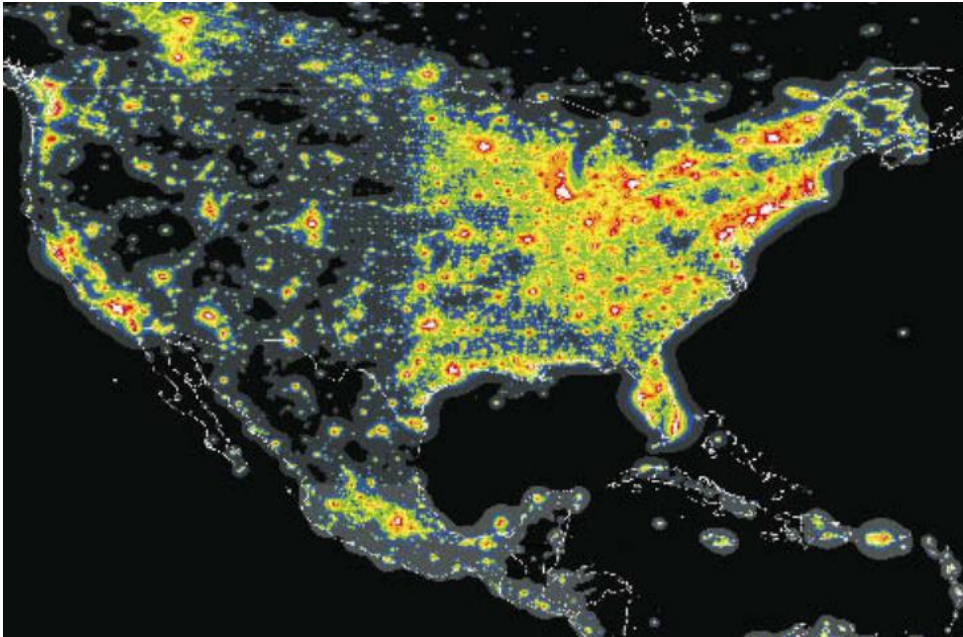


Figura 3.10 Imagen del "The first world atlas of artificial night sky brightness" (Cinzano, Falchi et al. 2001)

3.3.6 Modelo de Aubé.

En el año 2005 Martin Aubé desarrolla un modelo teniendo en cuenta variables orográficas y topográficas de la superficie (Aube, Franchomme-Fosse et al. 2005). Su modelo se basa en el de Garstang (Garstang 1991):

$$I_{no} \approx I_1 + I_{r1} + I_2 + I_{r2} \qquad \text{Fórmula 3.9}$$

Donde:

I_{no} = Brillo del cielo.

I_1 = Intensidad en el cielo por la dispersión de primer orden.

I_{r1} = Intensidad en el cielo por la dispersión de primer orden debido al reflejo en el suelo

I_2 = Intensidad en el cielo por la dispersión de primer orden.

I_{r2} = Intensidad en el cielo por la dispersión de primer orden debido al reflejo en el suelo

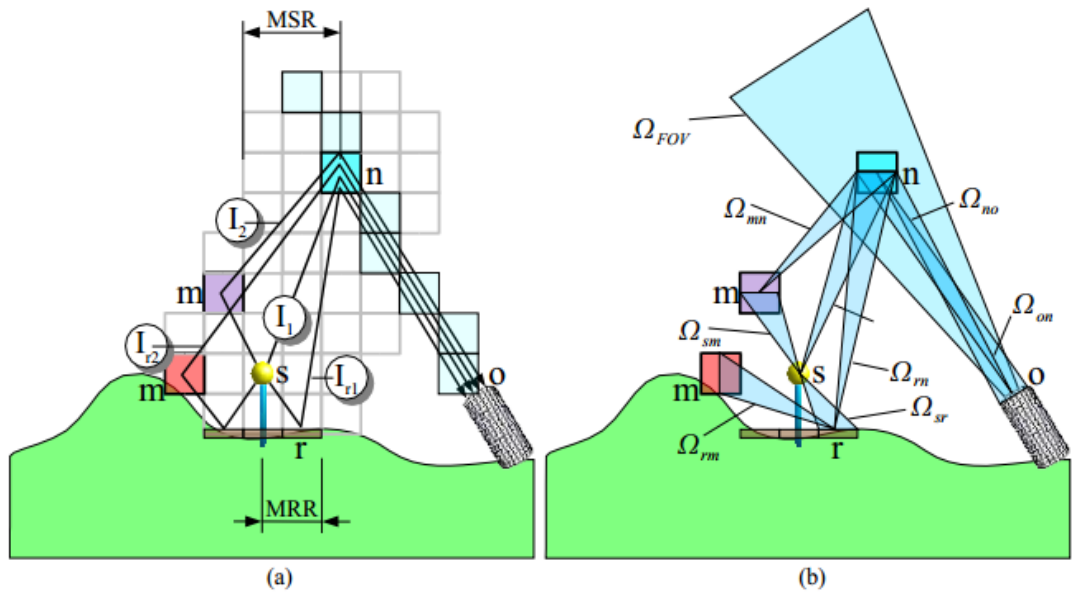


Figure 2: Modelling geometry and most important contribution to the received flux by a spectrometer in position o.

Figura 3.11 Esquema del modelo de Aubé (Aube, Franchomme-Fosse et al. 2005)

El modelo pero, presenta dificultades técnicas (considera la ciudad un punto homogéneo de emisión) y son necesarias medidas in situ tanto de la CL como de los aerosoles en suspensión. Medidas que requieren un material caro y difícil de usar.

3.3.7 Modelo de Kocifaj.

El Dr. Miroslav Kocifaj en 2007 considera un factor muy importante: El clima en el momento de medición (Kocifaj 2007). El modelo permite calcular la CL con nubes y con atmósfera despejada y permite hacer una aproximación de las moléculas en suspensión. La ecuación utilizada es, en el caso de cielo descubierto es (Kocifaj 2013):

$$L_{\lambda}(z_o, a_o) = M(z_o) = \int_S \int_h^H B_{\lambda}(z_E(h)) \cdot \cos^2 z_E(h) \cdot \frac{t_{\lambda}(h, z_E) \cdot t_{\lambda}(h, z_o)}{h^2} \cdot \Gamma_{\lambda}(h, \theta) \cdot dhds$$

Fórmula 3.10. Luminancia del cielo en condiciones de cielo descubierto

Donde:

$L_{\lambda}(z_o, a_o)$ = Luminancia de fondo de cielo para una longitud de onda λ y para unos ángulos cenitales y azimutales z_o y a_o .

S= Superficie de la zona de la ciudad que emite iluminación.

h: Altura al punto de visión , en metros.

H: Altura máxima estudiada en la atmósfera, en metros.

$B_{\lambda}(z_E(h))$ = Función de emisión para una longitud de onda determinada, y en función del ángulo de emisión z_E .

$t_{\lambda}(h, z)$: transmitancia atmosférica para una longitud de onda λ en un ángulo determinado z hasta la altura h .

$\Gamma_\lambda(h, \Theta)$: Probabilidad de dispersión atmosférica para una longitud de onda λ en un ángulo determinado Θ hasta la altura h .

Todo y que el modelo completo proporciona otras variables, como nubosidad, presencia de Luna, etc.

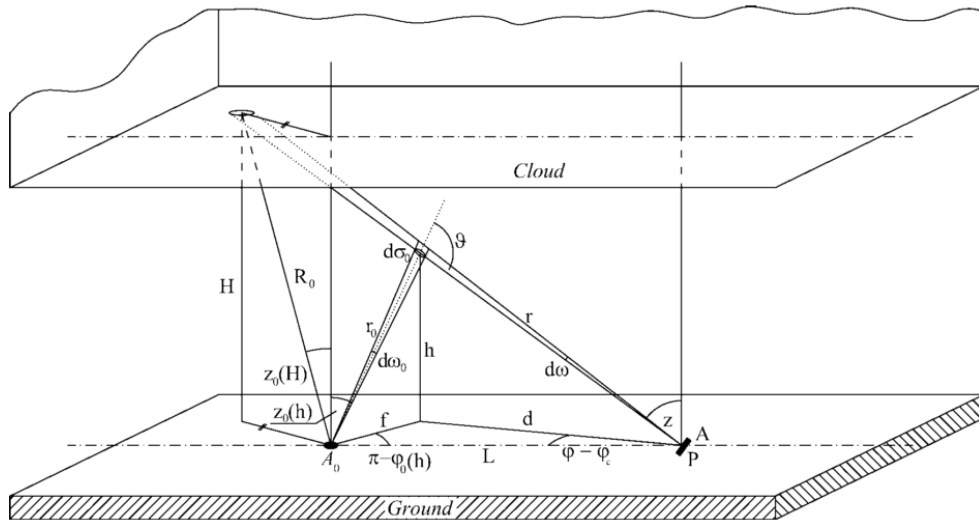


Fig. 1. Geometrical setup of the light-pollution model.

Figura 3.12 Esquema geométrico del modelo de Kocifaj con nubes (Kocifaj 2007)

La aplicación es compleja y el autor ha desarrollado un aplicativo para poder realizar comprobaciones, todo y que el tiempo de computación de la versión es relativamente elevado (Kocifaj 2015).

3.3.8 Iluminación horizontal a partir del brillo de la cúpula.

Un aspecto colateral a tener en cuenta, es la influencia del brillo del cielo con el nivel de iluminación del suelo. Es decir, cuando el cielo se comporta como un emisor de luz, y genera CL como fuente contaminante.

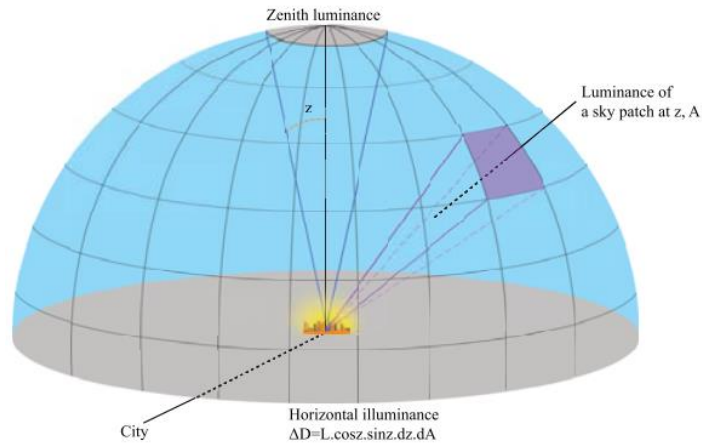


Figura 3.13 Ilustración de cómo se calcula el nivel lumínico en el suelo en función del brillo de la cúpula celeste

Kocifaj y Solano han publicado un artículo (Kocifaj and Solano 2014) analizando esa influencia a partir del factor R, es:

$$D = R \cdot B \qquad \text{Fórmula 3.11}$$

Donde:

D: Nivel de iluminación horizontal en el suelo en luxes.

R: Factor de conversión

B: Brillo del cielo en el Cénit en cd/m².

El cálculo de R es complejo, y habitualmente da como resultado, valores entre π y $2,2 \cdot \pi$ en función de cómo es la salida de flujo de las fuentes contaminantes, la composición atmosférica, etc.

El valor de fondo de cielo es muy variable para cada ubicación, en función de múltiples factores (encendido y regulación de sistemas de iluminación, composición atmosférica, etc.). Pero la variable que se ha observado que tiene un factor de amplificación (AF) más grande es la cobertura debido a nubes. Según publicaciones realizadas por dos equipos de investigación, se tienen los siguientes resultados:

Oktas	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Filtro lumínico	1	1,0	1,5	1,6	1,9	3,6	3,2	8,8	14,6
Filtro rojo	1	1,0	1,7	1,9	2,4	4,0	4,3	10,7	17,6
Filtro verde	1	1,0	1,5	1,5	1,9	2,8	2,9	6,9	12,1
Filtro azul	1	1,0	1,2	1,3	1,5	2,1	1,9	2,9	7,1

Tabla 3.2 Valor observado de AF, y medido mediante filtros en SQM. Elaboración propia a partir de (Kyba, Ruhtz et al. 2012):

El equipo de Solano y Kocifaj hizo predicciones matemáticas en función de la tipología de nubes, distancia al núcleo de población, etc (Kocifaj 2014). Los valores observados van de unos valores pico de AF entre a 1,6 a 8,16.

3.3.9 Conclusiones de la consideración de modelos.

Los modelos anteriores han sido usados por varios científicos con diferente éxito y rigurosidad. Sin embargo, las conclusiones que podemos extraer para el objetivo de este trabajo son:

- Ninguno de los modelos tiene en cuenta las características intrínsecas de la fuente de contaminación. No tiene en cuenta las instalaciones de alumbrado (fotometría, lámparas) o urbanísticas (reflexión en fachadas, niveles lumínicos). De forma que no pueden compararse ciudades de diferente política de alumbrado, como podrían ser Valencia y Barcelona (Maseres 2009). Actualmente sólo se realiza esta acción a partir de la constante conocida como el número de Garstang de valor incierto (Narisada and Schreuder 2004), y la determinación de constantes experimentales.
- Hay modelos que, todo y tener una gran precisión, presentan problemas de carácter operativo y experimental (como el de Aubé)
- Kocifaj presenta la posibilidad de realizar modelos teniendo en cuenta las características climáticas, pero su necesidad de cálculo son elevadas, y el uso para proyectos de ingeniería es inviable de forma directa.
- Se observa un factor amplificador (AF) de la CL, que se incrementa de forma muy importante debido a la cobertura por nubes. El factor se ha cuantificado matemática y experimentalmente por dos grupos de investigación.

Para cuantificar la repercusión del incremento de luz del fondo de cielo, hay que determinar cuál es la pérdida debido a la CL. En base a ello, se deben considerar diferentes factores, y la sensibilidad del entorno. Por ejemplo para observación astronómica profesional o mediante filtros diferentes a la visión humana hay que usar y tener en cuenta los rangos de espectro de estudio. Para la visión humana, se ha propuesto una escala sencilla para poder evaluar la repercusión de este incremento de brillo:

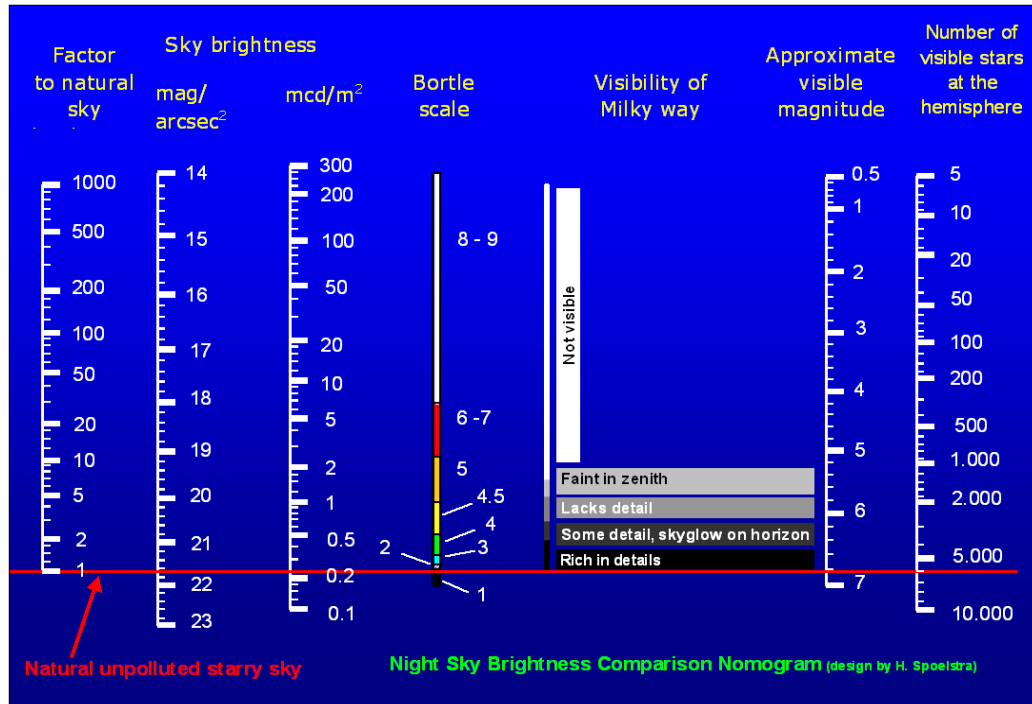


Figura 3.14 Diferentes escalas de evaluación de la visión del cielo estrellado en función de su brillo (Spoelstra 2013)

3.4 Cuantificación del foco contaminante.

3.4.1 Visión por satélite.

Una de las formas de evaluar la emisión del foco contaminante es a partir de la visión por satélite. Esta parte de la consideración que la ciudad tiene una emisión con una cierta distribución espectral similar (Garstang 1986), y mediante el cálculo de la intensidad lumínica detectada por satélite, y una serie de correcciones por la presencia de partículas en la atmósfera, se puede evaluar su flujo lumínico saliente. El método es aproximado, pero ha servido para evaluar la problemática a escala global y comparar grandes instalaciones dando órdenes de magnitud para su consideración y comparación posterior.

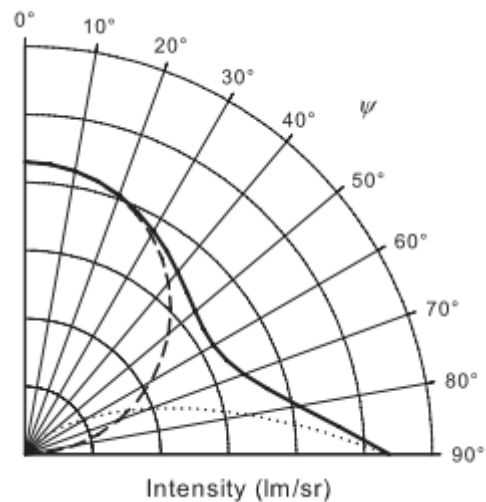


Figura 3.15 Distribución angular de la salida de emisión hacia el cielo (línea continua) por el modelo de Garstang (Garstang 1986), extraído de (Luginbuhl, Duriscoe et al. 2009). Consideración de emisión Lambertiana para un FHIi del 90% (línea discontinua a rayas) y con un 15% de reflectancia y un F.H.S.i. del 10% (línea punteada).

La Universidad Complutense de Madrid ha desarrollado diferentes trabajos al respecto, para la evaluación de la modificación de la CL en el tiempo y caracterización de la misma (Sanchez de Miguel 2010, Zamorano, Sanchez de Miguel et al. 2011, Sánchez de Miguel, Zamorano et al. 2014). Y la visión por satélite junto con la colaboración ciudadana están siendo unas de las líneas de trabajo de la UCM (Sanchez de Miguel, Gomez Castano et al. 2014) , y está teniendo repercusión en los medios de comunicación.


MEDIO AMBIENTE »


Se buscan voluntarios para combatir la contaminación lumínica

- Un proyecto español pide ayuda para localizar las fotografías nocturnas de la estación espacial
- Auroras boreales, relámpagos y amaneceres desde la órbita terrestre
- Más noticias sobre contaminación

MIGUEL PÉREZ GARCÍA | Madrid | 20 OCT 2014 - 10:42 CEST 28

Archivado en: ISS Contaminación lumínica NASA Estaciones espaciales Fotografía Agencias espaciales Astronáutica Contaminación Problemas ambientales Ciencia

Enviar video 



La península Ibérica, desde la ISS. / NASA





	1.114	Muestran la Tierra desde otro punto de vista. Acaparan artículos, likes, retuits... Y frecuentemente caen en el olvido. Un proyecto español, <i>Cities at Night</i> , se ha propuesto clasificar las fotografías nocturnas de nuestro planeta hechas desde la Estación Espacial
	514	
	68	
	52	

Figura 3.16 Noticia en El País digital, en portada el día 20-oct-2014 (Perez García 2014).

3.4.2 Aproximaciones de emisiones de una ciudad.

Siempre ha habido incertidumbre a la hora de determinar el número de lúmenes contaminantes de una ciudad. La falta de información de las instalaciones de alumbrado, el análisis por parte de astrónomos en visión desde el espacio y los aspectos urbanísticos a considerar han sido barreras difíciles de franquear.

En los modelos actuales se utiliza comúnmente las consideraciones y aportaciones de los modelos de Garstang (Garstang 1986, Garstang 1991). Se han usado de dos, principalmente:

- La consideración principalmente lambertiana de la ciudad cuando se produce reflexión.

-
- El cálculo de número de lúmenes contaminantes a partir del denominado número de Garstang como 1000 lúmenes/habitantes.
 - El modelo de Garstang para la emisión de lúmenes es considerando una reflexión del 15% de las superficies reflectores de la Ciudad (fachadas, pavimentos...) y un F.H.S.i.=15% también.

Estas estimaciones, todo y que aproximadas, han servido para poder caracterizar el brillo del cielo y los modelos por satélite durante décadas debido a su sencillez y su validez en grandes áreas. A pesar de ello, son difíciles de poder integrar en un proceso de evaluación ambiental. Es la dimensión de estas variables luminotécnicas lo que se desea evaluar para determinar su impacto.

3.4.3 La cúpula celeste como foco contaminante.

En la actualidad, están surgiendo estudios que determinan la importancia del brillo del cielo durante la noche como emisor de luz que altera el ecosistema natural. Un emisor de luz que, todo y ser de intensidad muy moderada, genera una intrusión general y muy extensa en los ecosistemas nocturnos. La necesidad de oscuridad importante para muchas especies naturales, hace que niveles de CL en el cielo afecte a su comportamiento (Kyba, Ruhtz et al. 2011, Kyba, Hanel et al. 2014). Además la cobertura de nubes ocasiona un incremento potencial de esta contaminación (Ver apartado 3.1).

El equipo de Kocifaj y Solano, ha desarrollado un modelo matemático para evaluar la aportación del cielo como foco contaminante, y proporcionando una forma de calcular numéricamente esta afectación (se puede ver en el apartado 3.3.8).

3.4.4 Influencia de las características de sistemas de alumbrado.

Los sistemas de alumbrado, como fuente contaminante, tienen una aportación u otra a la CL en función de sus características intrínsecas. Es importante integrar estas en la metodología a aplicar, puesto que dependerá de ellas su evaluación y la posibilidad de minimizar las repercusiones asociadas a su servicio. En el apartado 2.3 se describieron las características más importantes, y hay algunas publicaciones que resumen las repercusiones más importantes:

- **Importancia del ángulo de emisión del flujo lumínico:** El recorrido que tiene el flujo lumínico por la atmósfera afecta de forma importante. Cuando la luz se emite en ángulos cercanos a la horizontal, el haz lumínico recorrerá mayor distancia por la atmósfera, y por zonas de mayor concentración de partículas. Por lo tanto tendrá mayor probabilidad de dispersarse.

Flujo hacia el cielo	Ratio del "Sky-glow"		
	50 km	100 km	200 km
0%	1.0	1.0	1.0
1%	1.3	1.6	2.0
3%	1.8	2.7	3.9
10%	3.8	6.7	10.6

Tabla 3.3 Proporción de brillo en el cielo de luminarias de 0% al 10%, medido en observatorios a 50, 100 y 400 km. Elaboración propia a partir de (Luginbuhl, Walker et al. 2009).

- **Importancia del espectro de emisión:**

- Respecto al brillo en el cielo: Es conocida el efecto de la dispersión de Rayleigh, conocida ley atmosférica que dice que la radiación tiene una probabilidad de dispersarse en la atmósfera directamente proporcional a la longitud de onda elevada a "-4". Esta ley , que es aplicable en atmósferas despejadas de nubes y en buenas condiciones de observación, tiene como conclusión que las longitudes de onda más cortas se dispersan más por la atmósfera y por lo tanto son más contaminantes (espectros cercanos al azul). En cielos nublados o contaminados, se aplica la dispersión de MIE, que por el contrario, penaliza menos las longitudes cortas, proporcionando mayor peso a la contaminación cercana a los rojos.
- Salud humana: Tal como se ha comentado en el apartado 2.2.2, la posible supresión de melatonina debido a la luz intrusa, se concentra con mayor sensibilidad en los 480 nm , que es donde tienen su pico las células IpRGCs. Y no tienen afectación para espectros cercanos al rojo.
- Ecosistemas nocturnos: Los animales de acción nocturna tiene principalmente sus sistemas visuales orientados a la visión escotópica. Por lo que de igual forma, se ven principalmente afectados por radiaciones cercanas al azul y son casi inmunes a las radiaciones hacia los rojos.

A modo de resumen, en 2013 se realizó un estudio que comparaba diferentes espectros de emisión y su potencial efecto contaminante respecto al iluminante CIE D65 (luz solar) , comparando: MSI-Melatonin Suppression Index ;IPI- Induced Photosynthesis Indix ; SLI-Star Light Index; :

Table 3. Photometric characteristics of lamps after scattering into the atmosphere.

Distance (km)	Clear sky						Cloudy sky					
	MSI		IPI		SLI		MSI		IPI		SLI	
	0	30	0	30	0	30	0	30	0	30	0	30
LPS	0.008	0.014	0.241	0.349	0.053	0.078	0.012	0.015	0.317	0.359	0.072	0.081
HPS	0.099	0.113	0.342	0.465	0.188	0.218	0.107	0.114	0.430	0.477	0.210	0.221
Metal Halide	0.663	0.634	0.678	0.651	0.547	0.567	0.647	0.631	0.658	0.648	0.563	0.570
Halogen	0.329	0.364	0.592	0.761	0.544	0.583	0.350	0.369	0.718	0.779	0.571	0.587
Incandescent	0.203	0.241	0.572	0.820	0.431	0.474	0.225	0.245	0.759	0.846	0.461	0.478
Fluorescent T8 cool-white	0.403	0.427	0.549	0.594	0.561	0.595	0.417	0.430	0.579	0.598	0.585	0.598
LED 5000 K	0.500	0.533	0.601	0.631	0.598	0.610	0.517	0.536	0.618	0.633	0.608	0.611
Philips LED 4000 K	0.422	0.445	0.555	0.607	0.521	0.550	0.435	0.448	0.591	0.611	0.543	0.553
LED 2700 K	0.261	0.280	0.439	0.516	0.330	0.349	0.271	0.282	0.492	0.524	0.346	0.352
Nichia Amber	0.026	0.038	0.384	0.598	0.12	0.156	0.034	0.040	0.543	0.620	0.146	0.159
Lumiled PC Amber	0.034	0.042	0.357	0.540	0.107	0.140	0.039	0.043	0.491	0.558	0.131	0.144
LED 5000 K Filtered	0.136	0.162	0.336	0.437	0.315	0.362	0.151	0.165	0.406	0.446	0.349	0.367
LED 2700 K Filtered	0.056	0.071	0.288	0.403	0.173	0.214	0.065	0.073	0.370	0.415	0.203	0.218
CIE D65	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Tabla 3.4 Características fotométricas de las lámparas en iluminación directa (Aubé, Roby et al. 2013).

También se han realizado estudios donde se comparan las influencias de diferentes fuentes de luz al brillo del cielo según la distancia de observación:

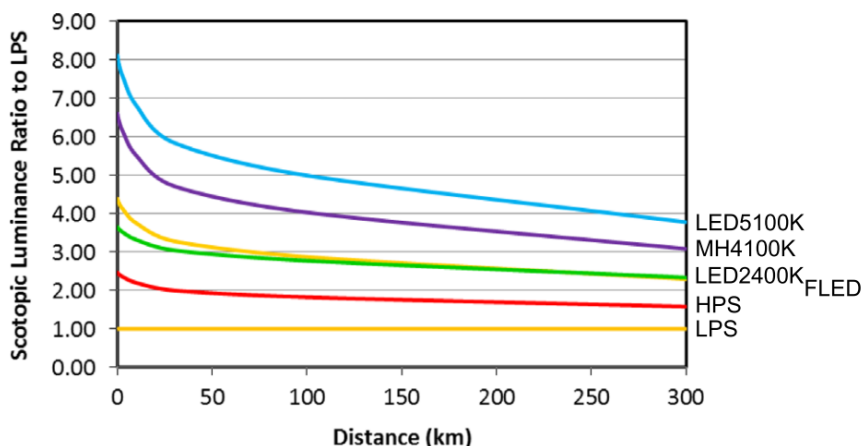


Figura 3.17 Incremento de brillo del cielo potencial de una fuente de luz respecto a Vapor Sodio a Baja Presión (Luginbuhl, Boley et al. 2013) para una longitud de onda de 550 nm, cerca del horizonte..

Todavía no hay suficientes estudios para evaluar las repercusiones de la gestión inteligente del alumbrado. Las conocidas como Smart Cities, que persiguen una gestión inteligente de las instalaciones, y el servicio de la luz en concreto, pueden proporcionar un encendido, apagado y regulación mucho más acorde con las necesidades del usuario del espacio. Y esto puede minimizar las repercusiones del uso del alumbrado.

3.4.5 Método RAMA-L.

El modelo de análisis RAMA-L parte de la consideración del flujo emitido por el alumbrado, la geometría de la zona de implantación y las reflexiones de pavimentos y fachadas y tiene como objetivo determinar la cantidad de flujo lumínico emitido hacia el cielo.

El planteamiento es esquemático y fácil de modelizar. Pueden incluirse puntos de luz no pertenecientes al alumbrado público, tales como rótulos, ventanas, escaparates, etc. El tratamiento informático utiliza programas informáticos estándares (como RELux o DIALux), aunque preferentemente con el módulo de interior, para poder calcular las reflexiones.

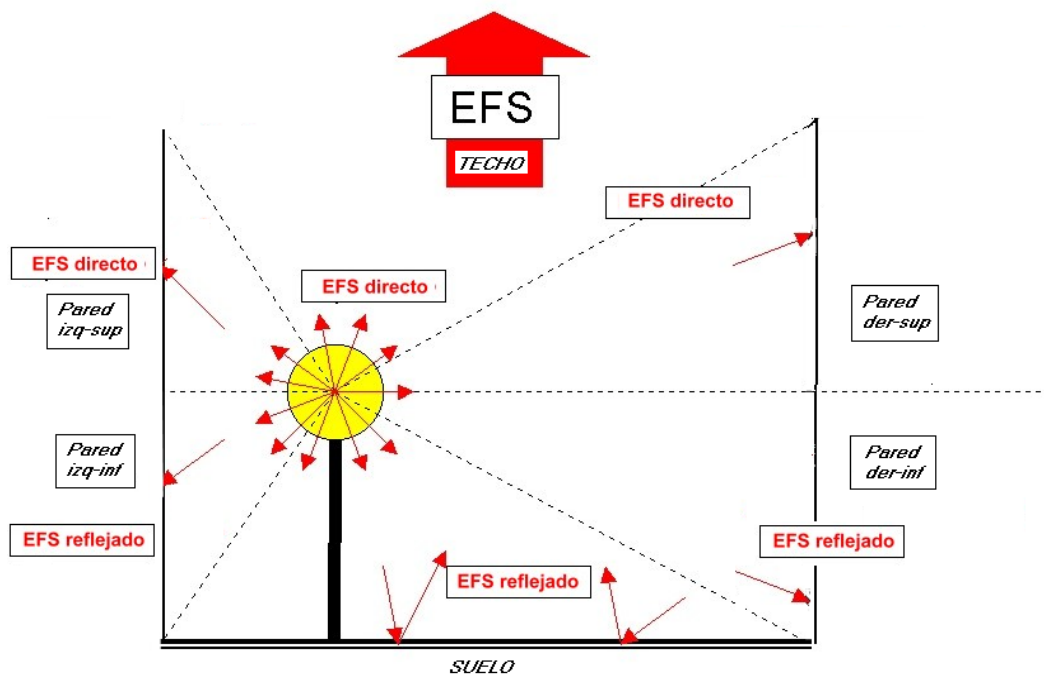


Figura 3.18 Esquemización tipo de una sección de calle (García Gil 2012)

El resultado del cálculo nos indica la cantidad de flujo, valorado en lúmenes, que estamos emitiendo hacia nuestro entorno. Y de él se pueden extraer diferentes variables a analizar y minimizar.

-
- **E.F.S. (EMISIÓN DE FLUJO SUPERIOR):** Se define como la cantidad de flujo lumínico que escapa de una instalación de alumbrado hacia el cielo. Se compone de:

- o La luz emitida directamente por las luminarias hacia el cielo (fracción del F.H.S.saliente).
- o El flujo reflejado por el suelo u otros elementos donde incida la luz artificial.
- o La disposición y la geometría de la zona iluminada, que pueden condicionar la cantidad real de flujo que escapa hacia el cielo:

Estudiando la iluminación de las paredes, podremos valorar la intrusión de luz. "Encendiendo o apagando" puntos de luz, conoceremos la influencia individual de cada uno de ellos, la proporción de contaminación debida al alumbrado público y la generada por otros tipos de alumbrado, etc. Es decir, con una operativa fácil y rápida, podemos analizar el efecto lumínico generado en el entorno, en sus distintos componentes.

3.4.6 Modelización estadística de áreas urbanas (UUF).

El método de determinación del UUF es una extrapolación del RAMA-L a gran escala(Estrada-García, García-Gil et al. 2015). Esta realizado a partir de la consideración de numerosos casos de calles, tipos de luminarias, etc., en diferentes situaciones. El cálculo para cada caso del E.F.S. sirvió para generar un modelo lineal de cálculo del Fu:

$$Fu = \frac{UUF}{TIF} \qquad \text{Fórmula 3.12}$$

Donde

UUF: Urbanised Upward Flux. Total de lúmenes contaminantes

TIF: Total flujo instalado en lúmenes.

Fu: Fracción de la luz contaminante respecto al flujo total instalado mediante una formulación estadística lineal función de $Fu = f(t, f, w, h, b, r)$. Donde:

t=Tipo de luminaria.

f: Ocupación de la vía.

w: Anchura de la vía en metros.

h: altura del punto de luz en metros.

b: altura de los edificios en metros.

r: reflectancia de las fachadas (si existen) en tanto por uno.

De forma que el total de flujo contaminante para una ciudad, es UUF [lm]:

$$UUF = \sum_{i=1}^n F_u(i)TIF(i)fd(i) \quad \text{Fórmula 3.13}$$

Donde:

TIF(i): Flujo total instalado en la zona i en lúmenes.

fd(i): Factor de depreciación para la zona i en tanto por uno.

Fu(i) Predicción del modelo lineal estadístico en esa zona i.

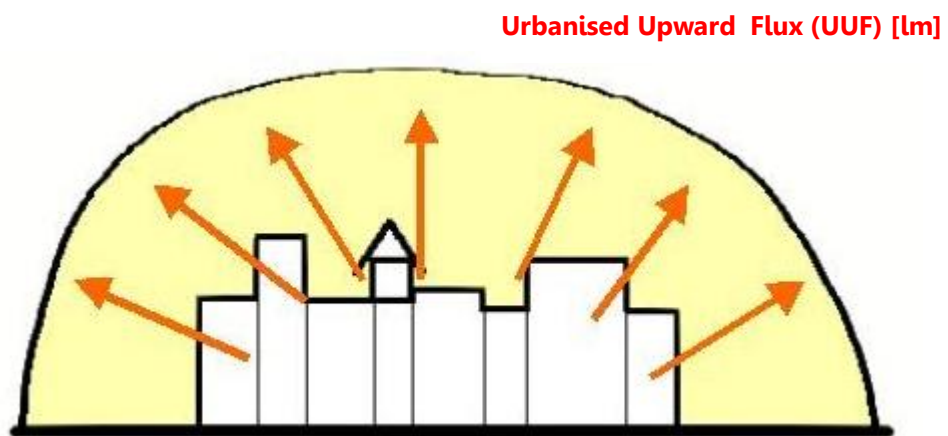


Figura 3.19 Flujo que escapa de una ciudad en lúmenes (García Gil 2012)

3.5 Conclusiones de este apartado.

La cuantificación de la CL está siendo un tema de trabajo importante en el sector. Se inició en los años 70 por astrónomos, pero ha sido a raíz de la proliferación de la problemática, y de múltiples estudios, cuando se ha multiplicado su investigación.

Frecuentemente se han considerado sus efectos, dejando a un lado acotar la relación con su foco de contaminación, por lo que ha sido difícil poder vincular la fuente y la repercusión.

Pero desde el año 2005 con la proliferación de modelos como:

- El de Kocifaj para el cálculo de brillo del cielo, en condiciones de visibilidad diversas (Kocifaj 2007, Kocifaj 2013, Kocifaj 2014).
- El cálculo de las emisiones contaminantes mediante el flujo contaminante de una ciudad (Estrada-García, García-Gil et al. 2015).
- El cálculo del efecto del cielo como foco contaminante en ecosistemas (Kocifaj and Solano 2014).
- La visión de la CL en los ecosistemas como una problemática global (Gaston, Bennie et al. 2013).
- La modelización de la supresión de la melatonina en función de las características de la luz irradiada en el ojo humano (Rea, Figueiro et al. 2005, Rea, Figueiro et al. 2010).

Y con el conocimiento exhaustivo de la fuente contaminante, es posible aproximar una predicción de la afectación de la CL sobre diversos entornos.

4. METODOLOGÍA DEL TRABAJO DE CAMPO.

El todo es más que la suma de las partes. (Metafísica)

Aristóteles

4. METODOLOGÍA DEL TRABAJO DE CAMPO.

4.1 Generalidades.

La recogida de datos, trabajo de campo y análisis resultados, han sido realizados con el objetivo de confirmar la hipótesis de la investigación. En ese sentido, existen tres fases identificadas:

- Análisis del foco contaminante.
- Medición de la afectación del foco contaminante.
- Detección de repercusiones asociadas.

En el caso de la detección de las repercusiones, y como se aclara en el alcance del proyecto, no se van a realizar comprobaciones ni trabajo experimental asociado, por estar fuera del desarrollo de este trabajo. El alcance va a estar orientado a la factibilidad de poder implantarlo posteriormente en proyectos de ingeniería por personal técnico, no científico.

Así pues un gráfico que ilustra el proceso seguido es el siguiente:

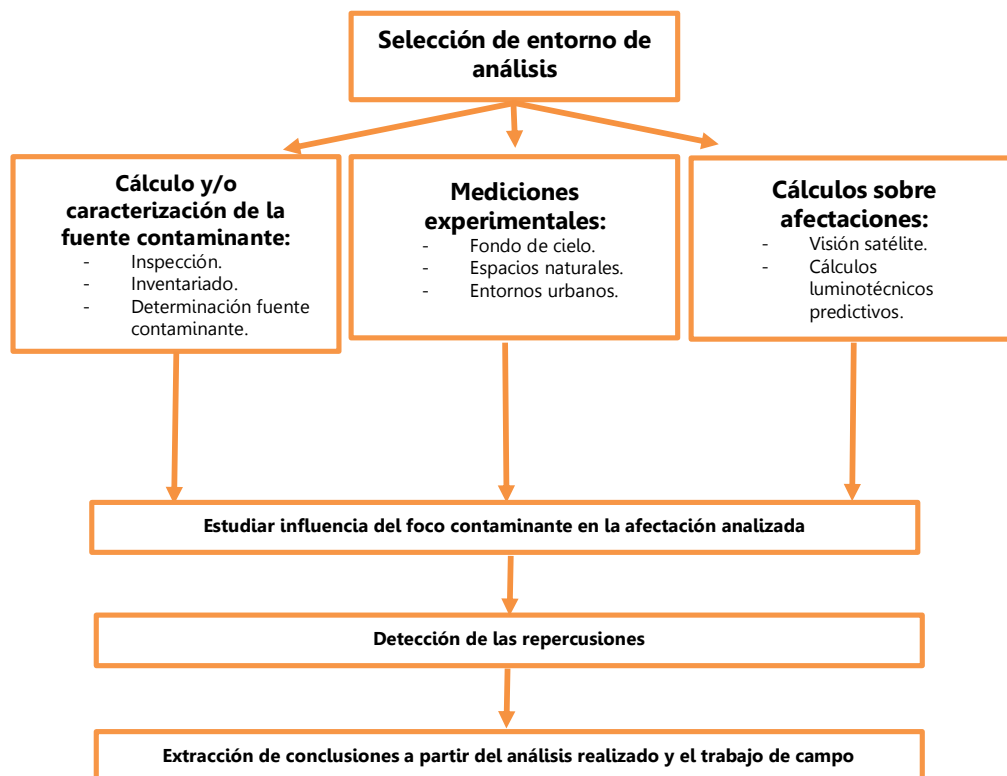


Figura 4.1 Esquema de la metodología experimental

Las fases se desarrollan a continuación:

4.2 Selección de entorno de análisis.

En el trabajo de campo ha sido importante determinar los lugares de estudio. Estos han sido escogidos por los siguientes criterios:

- Diferente tipología de sensibilidad a la CL.
- Posibilidad de aislar la problemática de estudio.
- Disponibilidad de información de los sistemas de iluminación.

El estudio de zonas urbanas se ha realizado en múltiples zonas: El Masnou, Barcelona, L'Hospitalet de Llobregat, Córdoba, Sevilla, Genalguacil, Saldes, etc. Pero la selección de entornos naturales ha sido más orientado en función de características específicas naturales. Estos entornos escogidos han sido:

4.2.1 Área Metropolitana de Barcelona (AMB).

Es la segunda concentración más importante de tejido urbano de España, y concentra más de 3 millones de habitantes en un espacio reducido:

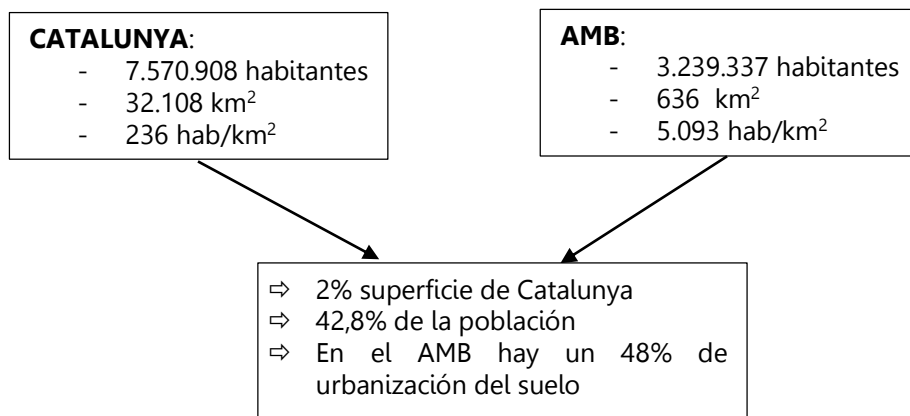


Figura 4.2 Datos globales del Área Metropolitana de Barcelona. Elaboración propia a partir de (AMB 2014)

En una zona muy pequeña se concentra una gran parte de la población. Están los municipios más importantes de Catalunya, con altísimas tasas de ocupación del suelo debido a barreras físicas y administrativas (el Mar Mediterráneo, la Sierra de Collserola, etc.). Y es una zona altamente contaminada lumínicamente.

Durante el transcurso de la investigación se pudo obtener información de las características de alumbrado público de la zona, y se pudieron realizar medidas de fondo de cielo y otras. Es por lo comentado que se escogió como zona de estudio.

4.2.2 Zona norte del Delta del Ebro.

El Delta del Ebro está localizado en la desembocadura del río Ebro. Cuenta actualmente con una extensión de 7.736 hectáreas y está declarada como Parque Natural, Reserva de la biosfera y zona ZEPA (Zona de Especial Protección de Aves). Está considerada como una importantísima reserva en España. Cuenta como el segundo humedal más importante de la Península Ibérica y uno de los más importantes de Europa.

La riqueza natural es un valor considerable, en todos los sentidos: Desde la flora, peces, anfibios, y sobre todo las aves. Por ejemplo en otoño se cuentan unos 53.000 patos, 13.000 fochas y en invierno descienden a 26.000 patos y 5.000 fochas. Suponen un 90% de las aves invernantes en Catalunya y el 10% de toda la península (P.N. Delta-Ebro 2015). En este reducido espacio, se reserva una gran riqueza. El Delta está dividido en dos partes claramente diferenciadas por el río Ebro. Las grandes aglomeraciones de asentamientos humanos están en la parte externa del delta (siguiendo la autopista AP-7) y en el centro con Deltebre y San Jaume d'Enveja.



Figura 4.3 Mapa general del Delta del Ebro (P.N. Delta-Ebro 2015)

Durante el año 2013 se realizó una modificación importante del alumbrado del Deltebre (con la adecuación y modificación de sus instalaciones por una Empresa de Servicios Energéticos). Se pudo disponer de primera mano de información de detalle del cambio y debido al carácter aislado de la zona, se realizaron diversas medidas de campo.

4.2.3 Parque Natural de Aracena y Picos de Aroche.

Este parque natural se declaró como tal, en el año 1989. Tiene una población de 41.000 habitantes distribuidos en 28 municipios de la provincia de Huelva. Su lejanía a grandes ciudades, y su actividad principalmente rural, lo hace un lugar especialmente protegido de las grandes aglomeraciones e intensidades lumínicas.



Figura 4.4 Mapa general del P.N. Sierra de Aracena y picos de Aroche (WIKANDA 2015)

El parque está adherido a la Carta Europea de Turismo Sostenible, es Reserva de la Biosfera, zona ZEPA, etc. En el año 2014 fue declarada Reserva del cielo oscuro por la iniciativa Starlight de la UNESCO (P.N.Sierra-Morena 2014).

4.3 Cálculo y caracterización del foco contaminante.

La primera fase de estudio ha sido la de cálculo y caracterización del foco contaminante. Para ello se han realizado varias inspecciones a las diferentes regiones, con objeto de conocer la tipología de instalaciones y su gestión.



Figura 4.5 Inspección de campo en P. N. Arcena

Estas inspecciones han sido apoyadas en todo momento con soporte de las administraciones asociadas que poseían información al respecto, mediante inventarios de las instalaciones (Diputación de Barcelona, Diputación de Huelva, ICAEN, Generalitat de Catalunya, Área Metropolitana de Barcelona, Junta de Andalucía, y los diferentes ayuntamientos y técnicos municipales implicados).

A partir de ello se ha podido conseguir información de:

- Tipología y potencia de lámparas
- Tipología y número de luminarias
- Sistemas de gestión

Y en algunos casos también de datos urbanísticos asociados según las características descritas en el apartado 2.3.2 Sistemas de alumbrado.

A partir de los datos obtenidos, se ha calculado la magnitud del foco contaminante. Esto se ha realizado a partir de los métodos RAMA-L y de cálculo del UUF según los apartados 3.4.5 y 3.4.6 del presente documento.

4.4 Mediciones experimentales.

Las mediciones experimentales han tenido 3 vertientes diferenciadas:

4.4.1 Mediciones de fondo de cielo.

Se han realizados mediciones de fondo de cielo mediante en 3 ámbitos:

- Medidas del cielo en territorios extensos mediante SQM, y se han considerado estudios e informes anteriores para su uso (Cinzano 2005) (Bará 2015, REECL 2015).
- Evolución del brillo del cielo en ubicación estática durante varias noches mediante SQM-LU-DL.
- Medición de toda la cúpula celeste mediante cámara All-Sky ASTMON (ITEC 2014).

Las características principales y descripciones ampliadas se pueden consultar en el Anexo E.

La metodología de recogida de datos ha seguido el siguiente método:

PARA RECOGIDA DE DATOS EN EXTENSOS TERRITORIOS MEDIANTE SQM):

La metodología a realizar para la recopilación de datos mediante el Sky Quality Meter es siempre la misma:

- Ubicación del sensor en posición vertical
- Evitar la existencia de luminarias en el ángulo de medida del dispositivo
- Realizar la medida

En el caso de la medida manual mediante el SQM se debe apuntar la medida; en el caso de la circulación en vehículo, se requiere un dispositivo GPS para referenciar las medidas a lo largo de todo el recorrido. Así se obtiene un gran volumen de datos que se puede mostrar gracias al uso de la tecnología de los Sistemas de Información Geográfica.



Figura 4.6. Muestra de vehículo con el sensor instalado para circular y registrar medidas.

PARA EVOLUCIÓN CIELO EN UBICACIÓN ESTÁTICA (SQM)

Para observar la afectación de la regulación de las instalaciones así como percibir cambios por reformas de instalaciones, se puede ubicar un SQM registrador y apreciar la variación en el brillo de fondo de cielo durante la noche o durante lapsos más largos de tiempo.

MEDICIÓN DE CIELO MEDIANTE CÁMARA ALL-SKY:

Necesita tener el soporte de un ordenador que le permite operar con un software que estima la posición de las estrellas, ajusta la orientación y detección de las estrellas para, calibrar fotométricamente las que son visibles y presentar los resultados.

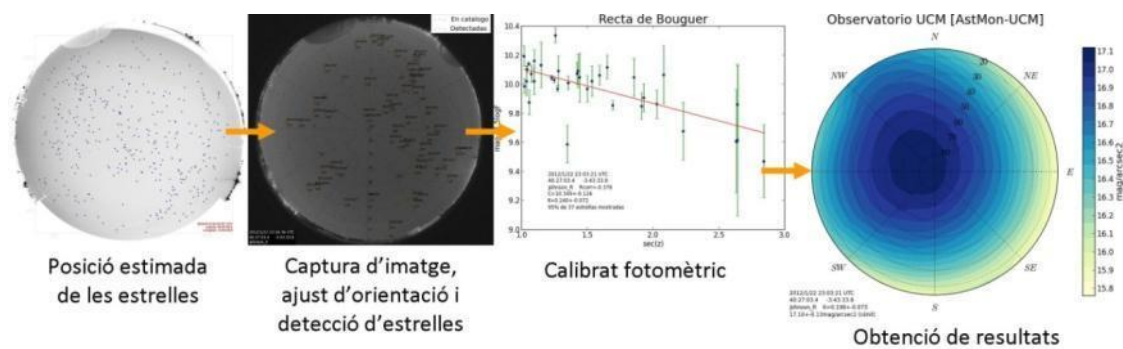


Figura 4.7. Proceso de obtención de resultados (ITEC 2014)

Hay diferentes metodologías para poder realizar este tipo de medidas. En los últimos años, con la proliferación de las cámaras CCD accesibles económicamente y el uso de métodos numéricos aplicados, se pueden conseguir resultados muy buenos (Rabaza, Aznar-Dols et al. 2014) (Rabaza, Galadí-Enríquez et al. 2010):.

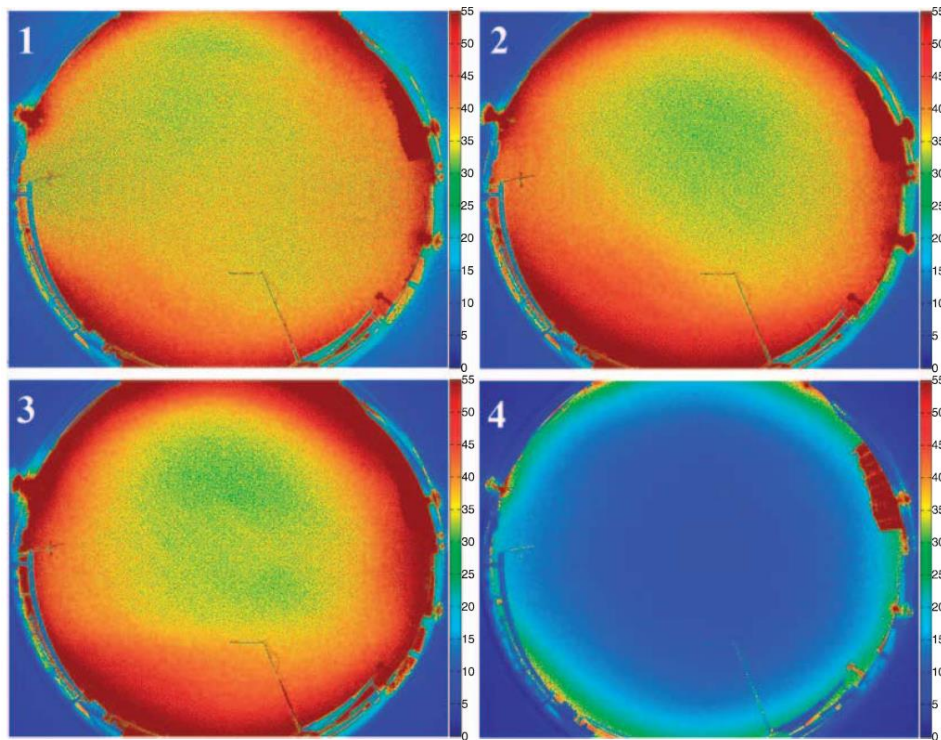


Figura 4.8. Iluminancia monocromática para varios filtros estudiados, en el método de la Universidad de Granada (Rabaza, Aznar-Dols et al. 2014).

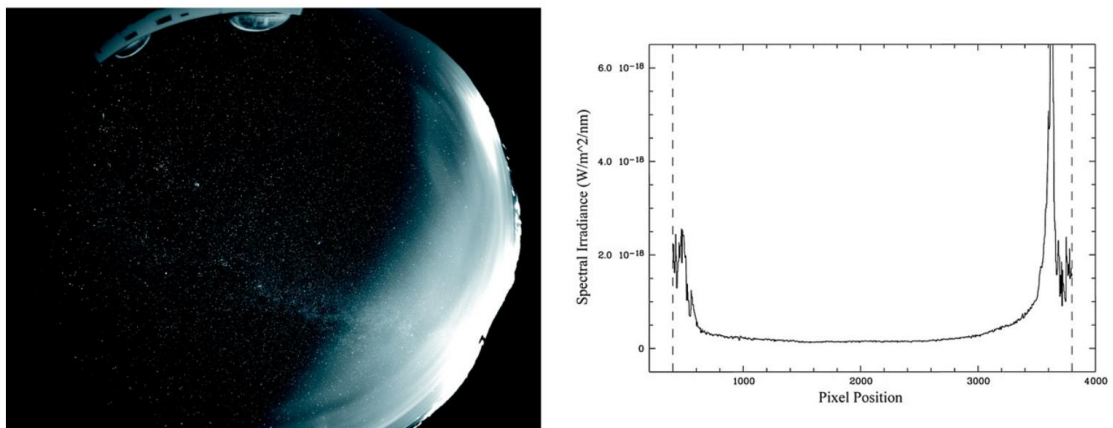


Figura 4.9. Imagen tomada con filtro R y análisis de Irradiancia (Rabaza, Galadí-Enríquez et al. 2010).

Las medidas se realizan en diferentes bandas espectrales del *sistema fotométrico de Johnson* (B , V , R) que es habitualmente utilizado en Astronomía. Puesto que son conocidos los brillos o magnitudes de las estrellas en dicho sistema fotométrico, es posible obtener un punto cero instrumental y en consecuencia se puede calibrar el brillo del fondo del cielo.

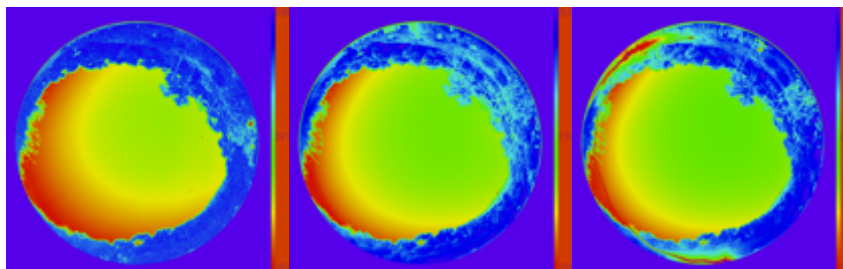


Figura 4.10. Medidas obtenidas con ASTMON en los filtros fotométricos Johnson B (izda.), R (centro) y V (dcha.)

Para iniciar las medidas el instrumento debe estar perfectamente nivelado, orientado al Norte y la hora (que la toma del PC) debe estar bien ajustada y en formato de tiempo universal (UTC). Además, el programa chequea las condiciones de observación, como son la hora, si hay luna o si ha comenzado o no la noche astronómica.

Si se cumplen las condiciones para poder medir el brillo del fondo de cielo, el equipo inicia un algoritmo en el que el programa completa todas las acciones necesarias para obtener una medida. El proceso completo está descrito también en el Anexo E.

4.4.2 Mediciones en espacios naturales.

Se han realizados mediciones de nivel lumínico en 2 ámbitos:

- Mediciones de luminancia mediante luminancímetro Gossen Mavo-Spot 2 (GOSSEN 2015).
- Mediciones de iluminancia mediante luxómetro PRC KROCKHMANN Radiolux 111 (PRC.Krochmann 2015).

Las características principales y descripciones ampliadas se pueden consultar en el Anexo E.

La metodología ha sido la siguiente: Para estudiar la afectación al ecosistema, se realiza el diagnóstico de la situación actual a partir de la observación desde el hábitat y ecosistema que sufre el impacto del alumbrado. Así, se realiza un estudio de fondo de cielo y luz intrusa en una serie de espacios predeterminados.



Figura 4.11. Imagen zona de estudio (Espacio natural del Remolar)

El objetivo de las medidas realizadas no es conseguir un escenario global de la situación de las instalaciones contaminantes sino caracterizar y ejemplificar casos sensibles y repercusiones reales al ecosistema cercano protegido, con el objetivo de poder promover acciones de protección y mitigación posteriores en espacios singulares.



Figura 4.12. Esquematzació de mesures de il·luminància horitzontal vertical i luminància respectivament.

4.4.3 Mediciones en entornos urbanos.

El objetivo es determinar la luz intrusa. Se realiza a partir de la medida de valor de iluminancia en la zona de estudio (allí donde fuera posible) o la confección de un mapa de luminancias a partir de fotografía digital.

El instrumental específico para esta consideración ha sido:

- Cámara fotográfica Nikon Coolpix 990 (DPREVIEW 2000).
- Cámara fotográfica Canon EOS-300D (CANON 2004).

Las características principales y descripciones ampliadas se pueden consultar en el Anexo E.

La metodología desarrollada ha sido la siguiente: En el proceso se desarrollan toda una serie de fotografías con diversas oberturas del sensor CCD para captar una imagen de la zona de estudio y después, mediante procesos fotométricos, obtener una imagen del nivel de iluminancia de la calle. Las cámaras fotográficas se utilizaron para ilustrar el trabajo de campo y para realizar representaciones de luminancia en colores falsos, de forma que sea posible realizar un barrido espacial de la luminancia de un determinado espacio o escena lumínica.

Se utilizó un software embebido en página web (Jacobs 2011) que utiliza la rutina de cálculo *hdrgen* (Ward 1998), para aplicar el procesamiento fotográfico High Dynamic Range (HDR) (Wikipedia 2015).

El proceso de calibración se basa en la realización de una serie de fotografías a diferente exposición (EV) y en condiciones controladas de compensación de temperatura de color, apertura, etc. Mediante las curvas de funcionamiento de la cámara y una calibración que se realiza con un luminancímetro sobre diferentes superficies (en este caso el Gossen Mavo Spot-2), se puede obtener una imagen con un mapa de luminancias para ser analizado.

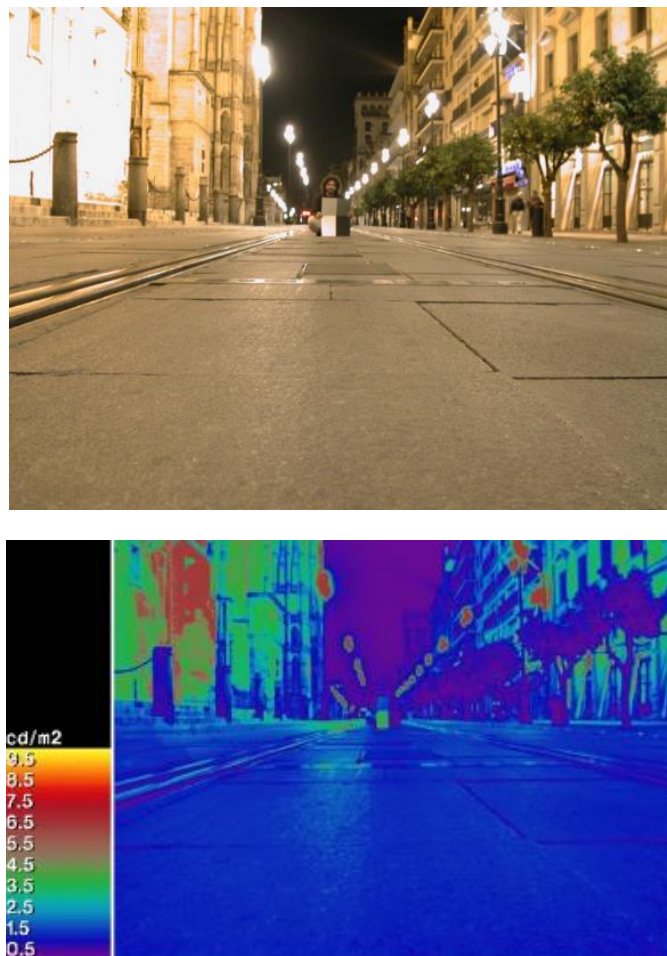


Figura 4.13. Muestra de calibración de la cámara Nikon Coolpix 990 en la Giralda de Sevilla (García Gil 2011)

A partir del resultado de la luminancia, y de la tipología de fachada, se ha extraído un valor de iluminancia mediante la consideración de una reflexión lambertiana de la fachada:

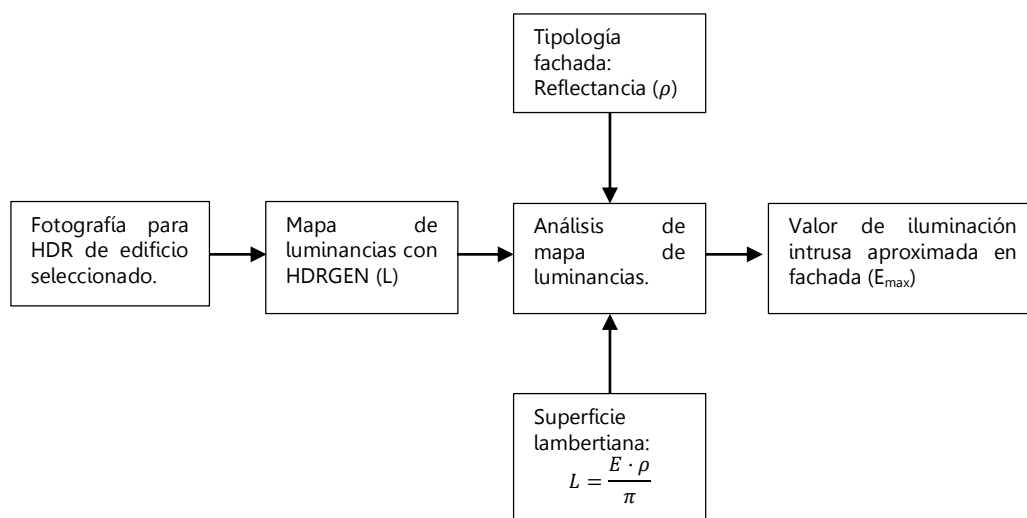


Figura 4.14. Esquema de metodología para la determinación de valores aproximados de luz intrusa en fachadas

Los resultados obtenidos a nivel de luminancias arrojan valores aproximados. Los resultados de valor de iluminación E_{max} (niveles de iluminación máximos en zona de descanso humano), factor por el que sólo puede ser considerado como “orden de magnitud”, no como valor totalmente riguroso. Los experimentos ampliados y considerados para esta metodología pueden consultarse en el trabajo docente realizado por Èlia Casas y dirigido por el autor (Casas Fernandez 2015).

4.5 Cálculos sobre afectaciones.

4.5.1 Cálculos luminotécnicos predictivos.

El uso del cálculo luminotécnico es una herramienta tradicional y comúnmente usada en la profesión. Se debe modelizar por completo el espacio considerado, teniendo en cuenta normalmente las fachadas de los edificios, así como su coeficiente de reflexión, y cualquier otro elemento de relevancia. Su desarrollo y detalle se puede seguir en bibliografía relacionada con el método RAMA-L (García Gil 2009, García Gil, San Martín Paramo et al. 2012). El objetivo es utilizar programas tradicionales de proyecto de iluminación para poder determinar la afectación lumínica en una superficie determinada:

- En el caso de analizar el “techo” de una calle, se obtendrá el valor del ya comentado E.F.S.

- En el caso de considerar las superficies de las fachadas, se podrá obtener la luz intrusa potencial.
- En el caso de considerar otras superficies, donde existan ecosistemas naturales (ríos, playas, etc.), se podrá determinar la afectación a estos entornos.

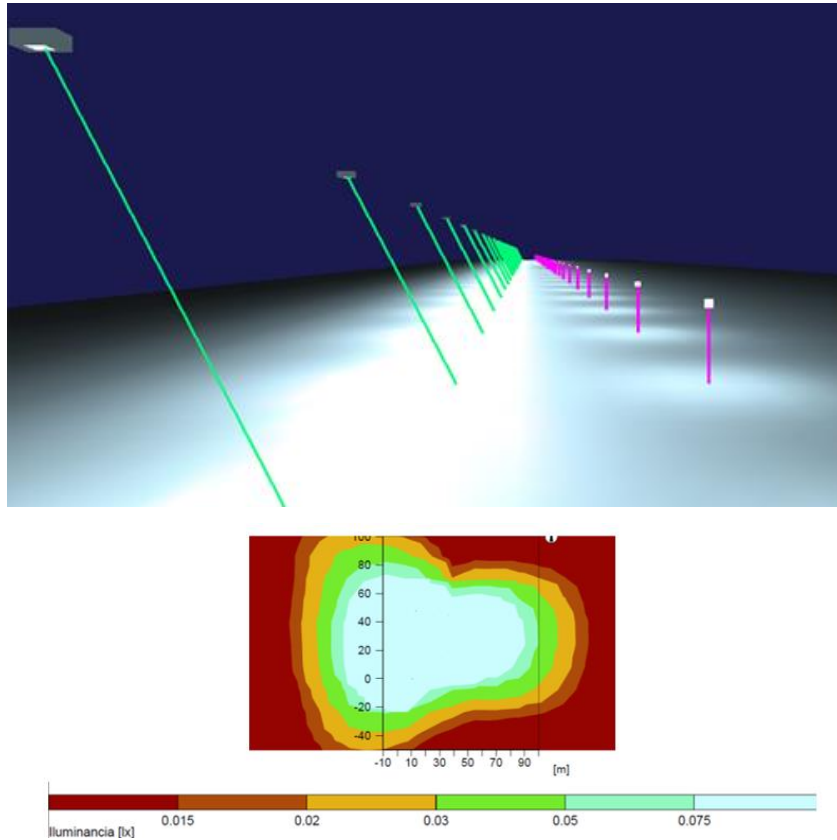


Figura 4.15. Ejemplo de simulación de un vial cercano a zonas de nidificación en el Delta del Ebro (Gómez Fernández 2015)

El resultado final proporciona un valor de predicción de nivel de iluminación en luxes y el conocimiento del espectro de emisión de la fuente de luz por su tipología.

4.5.2 Uso de imágenes de satélite.

Como se ha comentado en el apartado 3.4.1. Visión por satélite, esta herramienta es una forma de poder cuantificar el foco contaminante. Pero sobre todo para poder realizar comparaciones espaciales y temporales.

La Universidad Complutense de Madrid realiza trabajos muy importante en el campo, y un ejemplo es la recientemente publicada tesis del Dr. Alejandro Sánchez-de-Miguel (Sanchez-de-Miguel 2015).

Este proceso requiere de imágenes por satélite, realizadas mediante un sensor calibrado, así como datos del espectro de emisión, ángulo de captación, y cuentas detectadas por el sensor. A partir de ello es posible realizar comparaciones de estos valores.

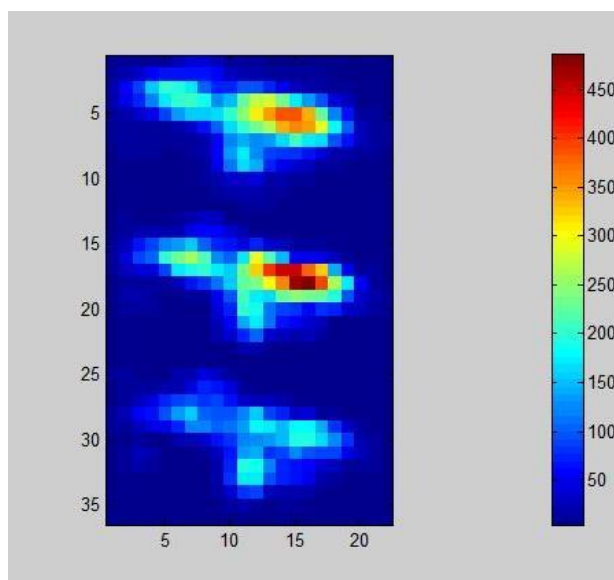
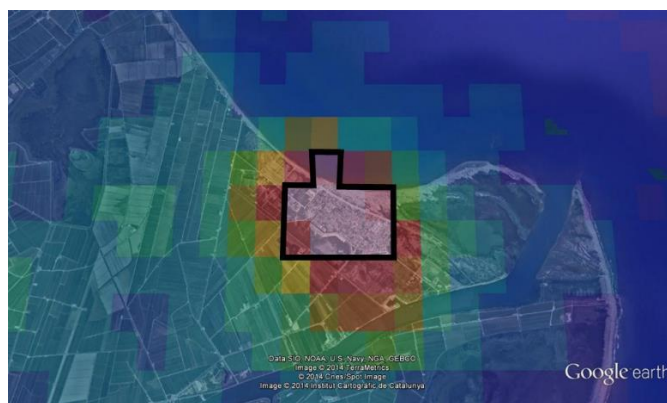


Figura 4.16., 4.17. , 4.18. Selección de celdas de cálculo de núcleo de Deltebre y Riumar y ejemplo de resultado de medición realizado por el equipo del artículo (Estrada-García, García-Gil et al. 2015).

4.6 Extracción de resultados.

A partir de los datos obtenidos se realiza una extracción de resultados con los siguientes objetivos:

- Estudiar la viabilidad de la detección del grado de CL en la zona de estudio.
- Posibilidad de implantar la metodología en proyectos de ingeniería y posibles inspecciones ambientales.
- Facilitar de correlación entre los resultados obtenidos en cálculo predictivo y posibles resultados futuros obtenidos a partir de modelos existentes.

5. TRABAJO DE CAMPO.

*Cuando te encuentras solo durante
muchas noches, menos mal que
queda la compañía de tus colegas y
de las estrellas.*

Susana Malón

5. TRABAJO DE CAMPO

En el desarrollo de la investigación se ha realizado un extenso trabajo de campo. Se han analizado diferentes afectaciones de la CL en función del entorno que sufre el impacto y con diferente material de medida. En particular, se ha considerado:

→ Para el análisis del brillo del cielo: Se ha medido la cúpula celeste, teniendo en cuenta posible evolución temporal, espacial, y en diferente grado de precisión de la medida: grado moderado, midiendo el cénit; grado elevado, midiendo toda la cúpula celeste nocturna mediante cámara All-Sky.

→ Análisis del ecosistema natural: En diferentes ubicaciones y en función de su distancia y orientación a la fuente contaminante.

→ Análisis de afectación de la iluminación en hábitat humano (fachadas de las viviendas): Medida de iluminancia a través del análisis inverso de cámaras fotográficas calibradas y cálculo luminotécnico.

El objetivo de este trabajo ha sido el de poder detectar diferentes situaciones, con diferente equipo de medida, y poder determinar:

- La afectación de instalaciones de alumbrado.
- Su viabilidad en el caso de usarlo como método de verificación en un proyecto real.
- Posibilidad de vincular los datos obtenidos con los modelos de predicción propuestos.

Se añade una recopilación de medidas, y otras extendidas se pueden consultar en los anexos. Otros trabajos complementarios no se han añadido con el objetivo de facilitar la estructura del presente documento.

Analizando por cada entorno tenemos:

5.1 Área Metropolitana de Barcelona.

5.1.1 Magnitud de foco contaminante.

A continuación se presentan los resultados resumen del análisis de las instalaciones. Estos pueden verse en más detalle en el Anexo J.

Los datos finales del cálculo del UUF total son:

Municipio	UUF [klm]	% UUF / UUF_{total AMB}
Badalona	19.961	6,4%
Badia del Vallès	1.451	0,5%
Barberà del Vallès	5.280	1,7%
Barcelona	105.454	33,7%
Begues	1.762	0,6%
Castellbisbal	4.605	1,5%
Castelldefels	8.406	2,7%
Cerdanyola del Vallès	9.562	3,1%
Cervelló	3.276	1,0%
Corbera de Llobregat	2.353	0,8%
Cornellà de Llobregat	9.903	3,2%
Esplugues de Llobregat	5.165	1,7%
Gavà	7.381	2,4%
Hospitalet de Llobregat (L')	17.229	5,5%
Molins de Rei	3.616	1,2%
Montcada i Reixac	5.022	1,6%
Montgat	2.693	0,9%
Pallejà	2.094	0,7%
Palma de Cervelló (La)	651	0,2%
Papiol (El)	999	0,3%
Prat de Llobregat (El)	7.431	2,4%
Ripollet	4.269	1,4%
Sant Adrià de Besòs	10.198	3,3%
Sant Andreu de la Barca	5.435	1,7%
Sant Boi de Llobregat	12.697	4,1%
Sant Climent de Llobregat	725	0,2%
Sant Cugat del Vallès	15.716	5,0%
Sant Feliu de Llobregat	7.267	2,3%
Sant Joan Despí	7.347	2,4%
Sant Just Desvern	2.672	0,9%
Sant Vicenç dels Horts	4.190	1,3%
Santa Coloma de Cervelló	1.589	0,5%
Santa Coloma de Gramenet	5.202	1,7%
Tiana	1.313	0,4%
Torrelles de Llobregat	1.398	0,4%
Viladecans	8.232	2,6%
TOTAL	312.544	100,0%

Tabla 5.1 Resultado final del UUF calculado en el A.M.B. en alumbrado público.

Y en formato gráfico:

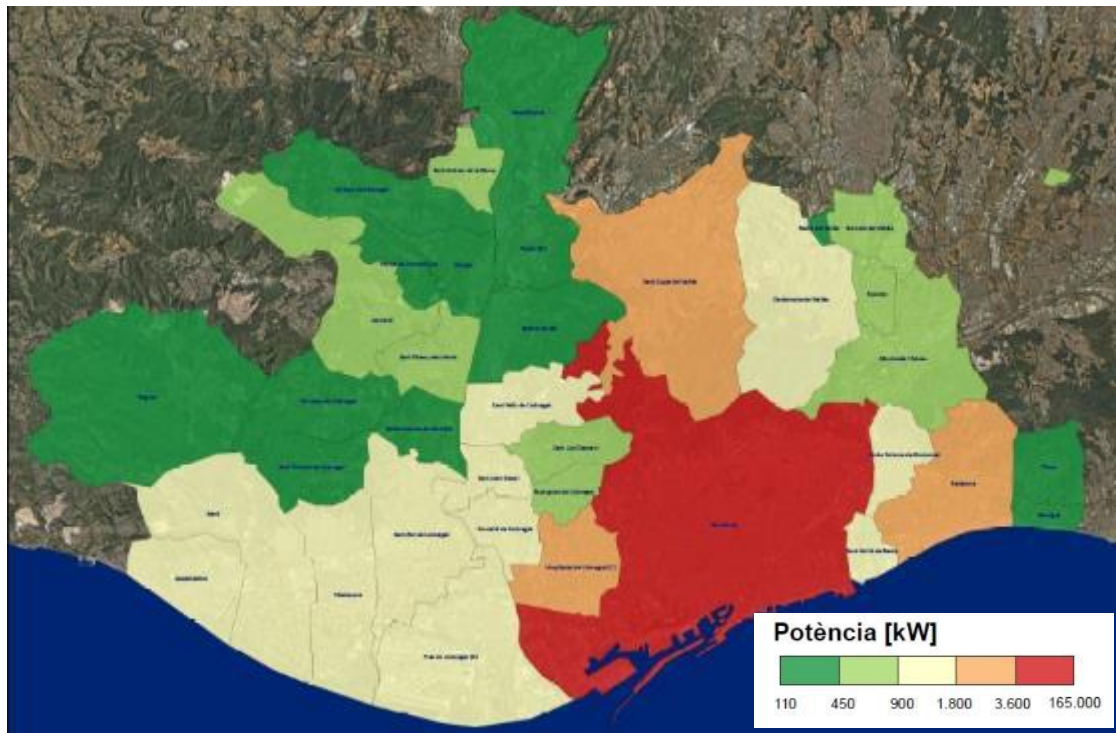


Figura 5.1. Distribución de potencia instalada en alumbrado público en AMB (Elaboración propia)

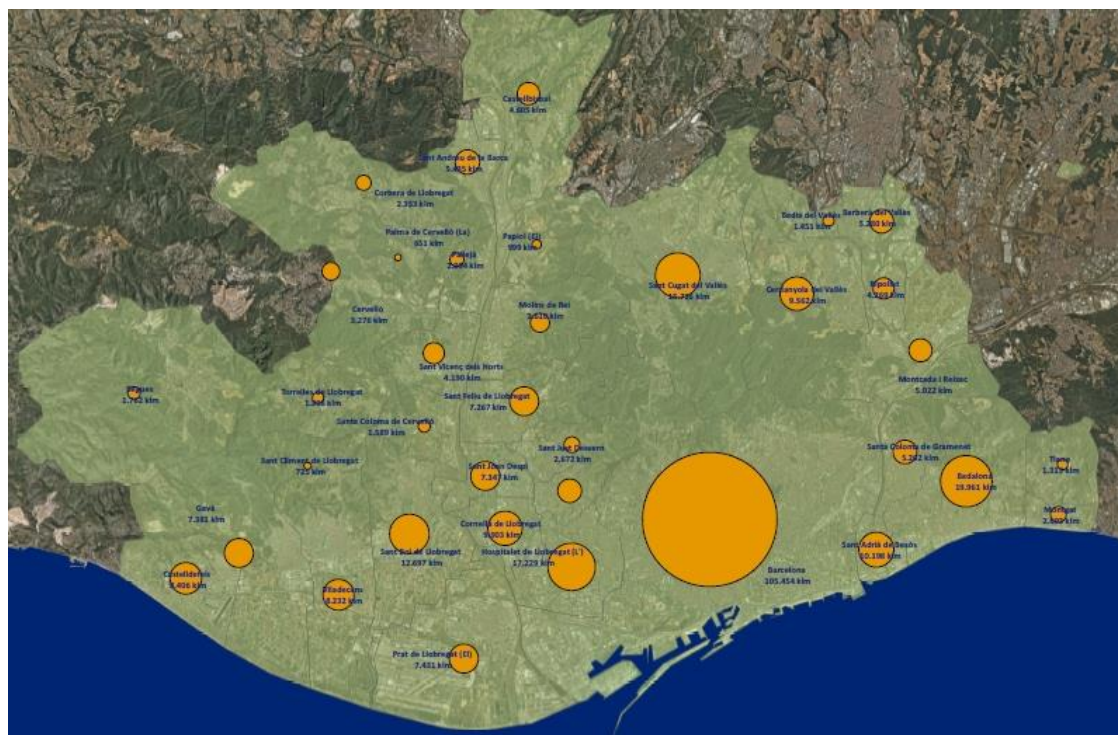


Figura 5.2. Magnitud contaminante en alumbrado público en AMB (en lúmenes) (Elaboración propia)

5.1.2 Medidas experimentales.

Como ejemplo, se presentan algunas medidas experimentales desarrolladas. Otras más pueden consultarse en los Anexos F y G.

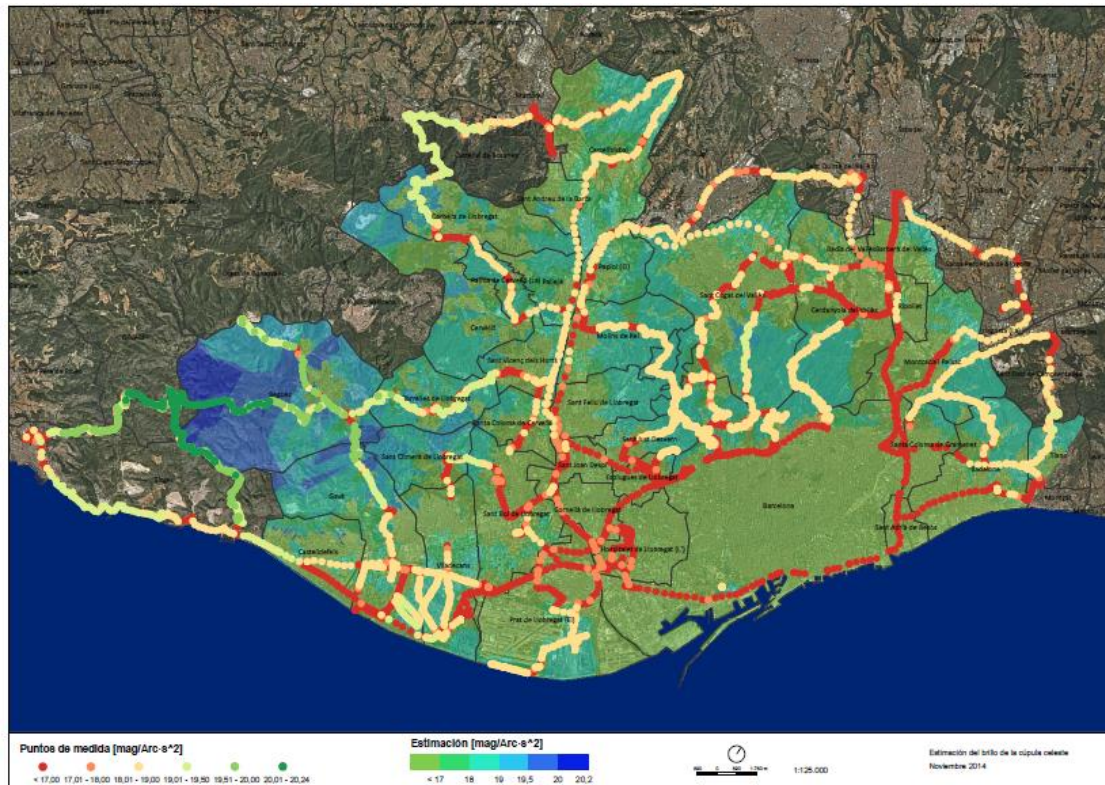


Figura 5.3. Mediciones de fondo de cielo con SQM-LU-DL en el AMB (Elaboración propia)



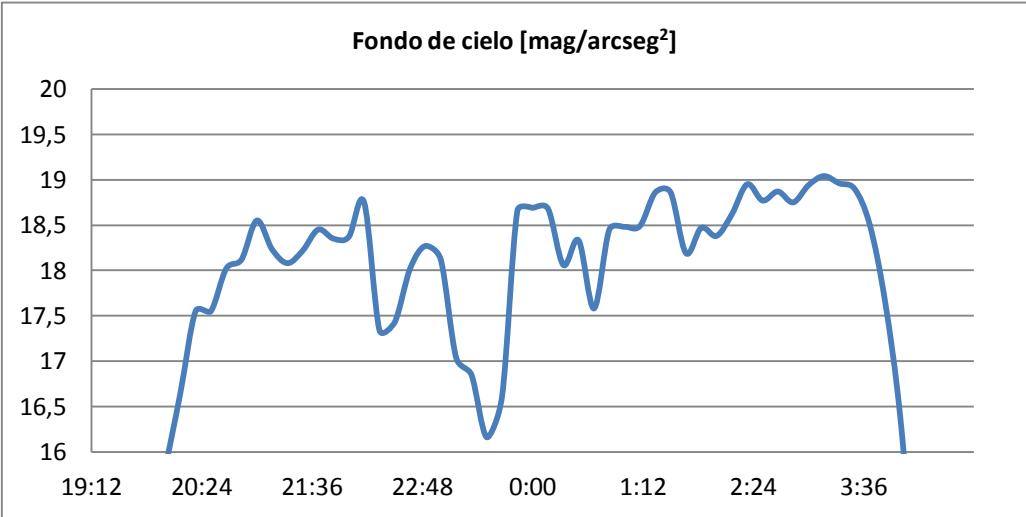
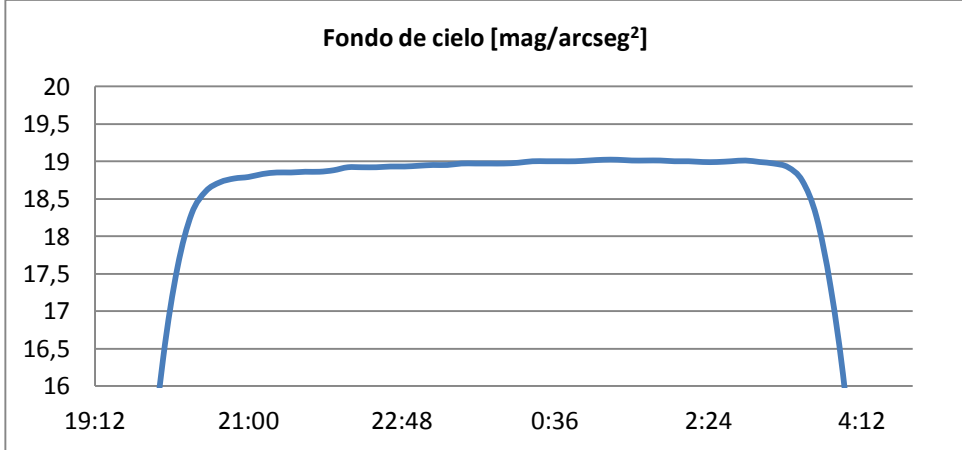
Ubicación: 1. Carretera de Molins		Período de recogida: 30/07/2014 al 04/8/2014																			
<u>Imagen ilustrativa:</u>		<u>Ubicación:</u>																			
																					
Medida representativa de noche con interferencias: Noche del 2/8/2014 al 3/8/2014																					
<p style="text-align: center;">Fondo de cielo [mag/arcseg²]</p>  <table border="1"> <caption>Approximate data for Sky Background with Interference</caption> <thead> <tr> <th>Time</th> <th>Magnitude [mag/arcsec²]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>19:12</td><td>16.5</td></tr> <tr><td>20:24</td><td>18.0</td></tr> <tr><td>21:36</td><td>18.5</td></tr> <tr><td>22:48</td><td>17.0</td></tr> <tr><td>0:00</td><td>18.5</td></tr> <tr><td>1:12</td><td>18.8</td></tr> <tr><td>2:24</td><td>19.0</td></tr> <tr><td>3:36</td><td>16.5</td></tr> </tbody> </table>				Time	Magnitude [mag/arcsec ²]	19:12	16.5	20:24	18.0	21:36	18.5	22:48	17.0	0:00	18.5	1:12	18.8	2:24	19.0	3:36	16.5
Time	Magnitude [mag/arcsec ²]																				
19:12	16.5																				
20:24	18.0																				
21:36	18.5																				
22:48	17.0																				
0:00	18.5																				
1:12	18.8																				
2:24	19.0																				
3:36	16.5																				
Medida representativa de noche oscura: Noche del 30/07/2014 al 31/07/2014																					
<p style="text-align: center;">Fondo de cielo [mag/arcseg²]</p>  <table border="1"> <caption>Approximate data for Sky Background in Dark Night</caption> <thead> <tr> <th>Time</th> <th>Magnitude [mag/arcsec²]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>19:12</td><td>16.5</td></tr> <tr><td>21:00</td><td>18.8</td></tr> <tr><td>22:48</td><td>19.0</td></tr> <tr><td>0:36</td><td>19.0</td></tr> <tr><td>2:24</td><td>19.0</td></tr> <tr><td>4:12</td><td>16.5</td></tr> </tbody> </table>				Time	Magnitude [mag/arcsec ²]	19:12	16.5	21:00	18.8	22:48	19.0	0:36	19.0	2:24	19.0	4:12	16.5				
Time	Magnitude [mag/arcsec ²]																				
19:12	16.5																				
21:00	18.8																				
22:48	19.0																				
0:36	19.0																				
2:24	19.0																				
4:12	16.5																				
<p>Máximo valor sostenido de fondo de cielo corregido (-0.11) en noche viable: 18,9 mag/arcsec²</p>																					

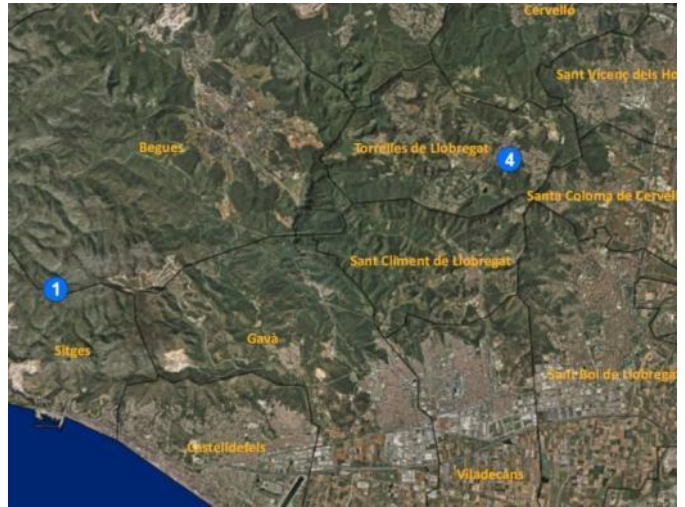
Tabla 5.2 Ficha tipo de medidas de fondo de cielo en ubicación 1: Carretera de Molins

MEDIDA 1: P.N. del Garraf

Población: Begues

(GPS: 41,282356 N; 1,906146 E)

Fecha y hora: 21/10/2014 (19:43 UTC)



SB (mag/arcsec ²)						
Archivos de medida	cénit	45° N	45° E	45° S	45° O	Filtro
20141021_194310	19,54	19,09	18,79	19,39	19,40	V
20141021_195258	19,23	19,05	18,79	19,46	19,35	V
20141021_193742	21,37	20,94	20,73	21,19	21,33	B
20141021_194835	19,02	18,55	18,26	18,90	18,88	R

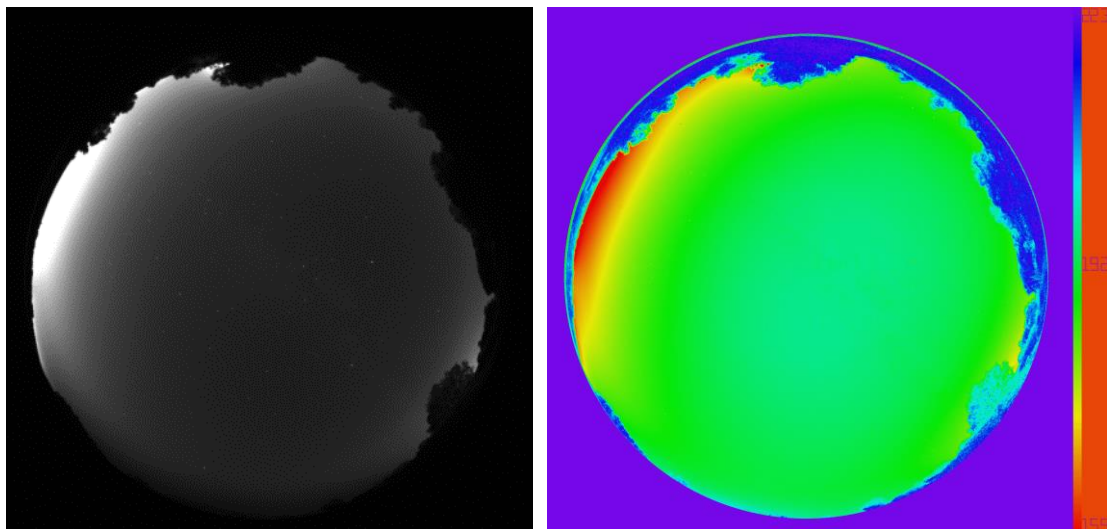


Figura 5.4. Imagen y mapa de brillo de cielo de ASTMOM P.N. Garraf (Elaboración propia)

MEDIDA [1]: AFECTACIÓN DEL ALUMBRADO DE LA AUTOPISTA A-2 AL ECOSISTEMA DEL RÍO LLOBREGAT

Población: Cornellà de Llobregat

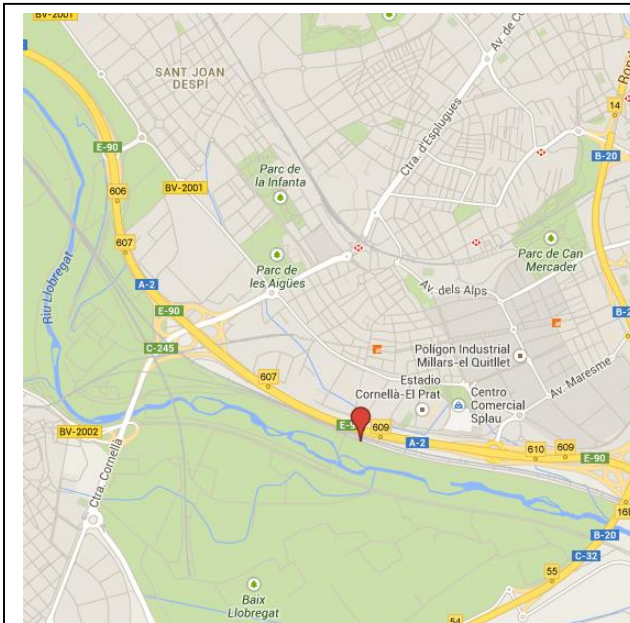
Ubicación: Camino del rio Llobregat

GPS: 41°20'46.1"N 2°04'11.9"E

Fecha y hora: 10/7/2014 22:43h

Foco Emisor: Autopista A-2. E-90.

Ubicación: Líneas de medida 1 en rojo, 2 en naranja y 3 en amarillo.



Visión Lumínica:

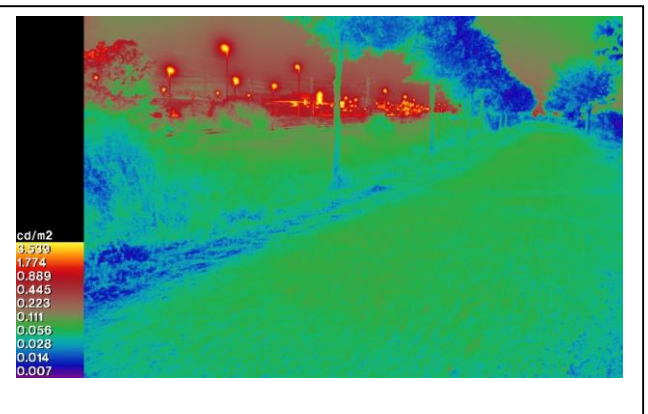
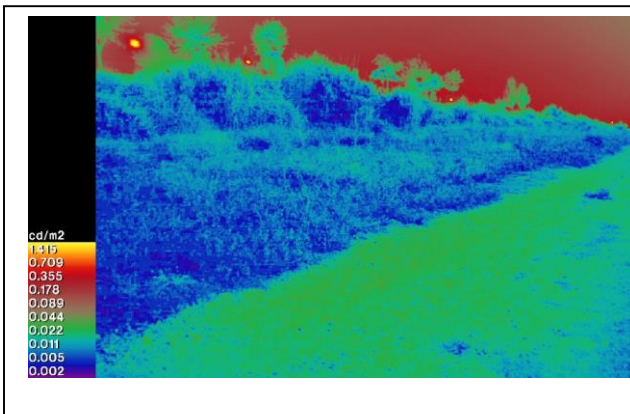


Figura 5.5. Ficha tipo de medida de afectación directa debido a la autopista A-2

Representación del nivel lumínico:

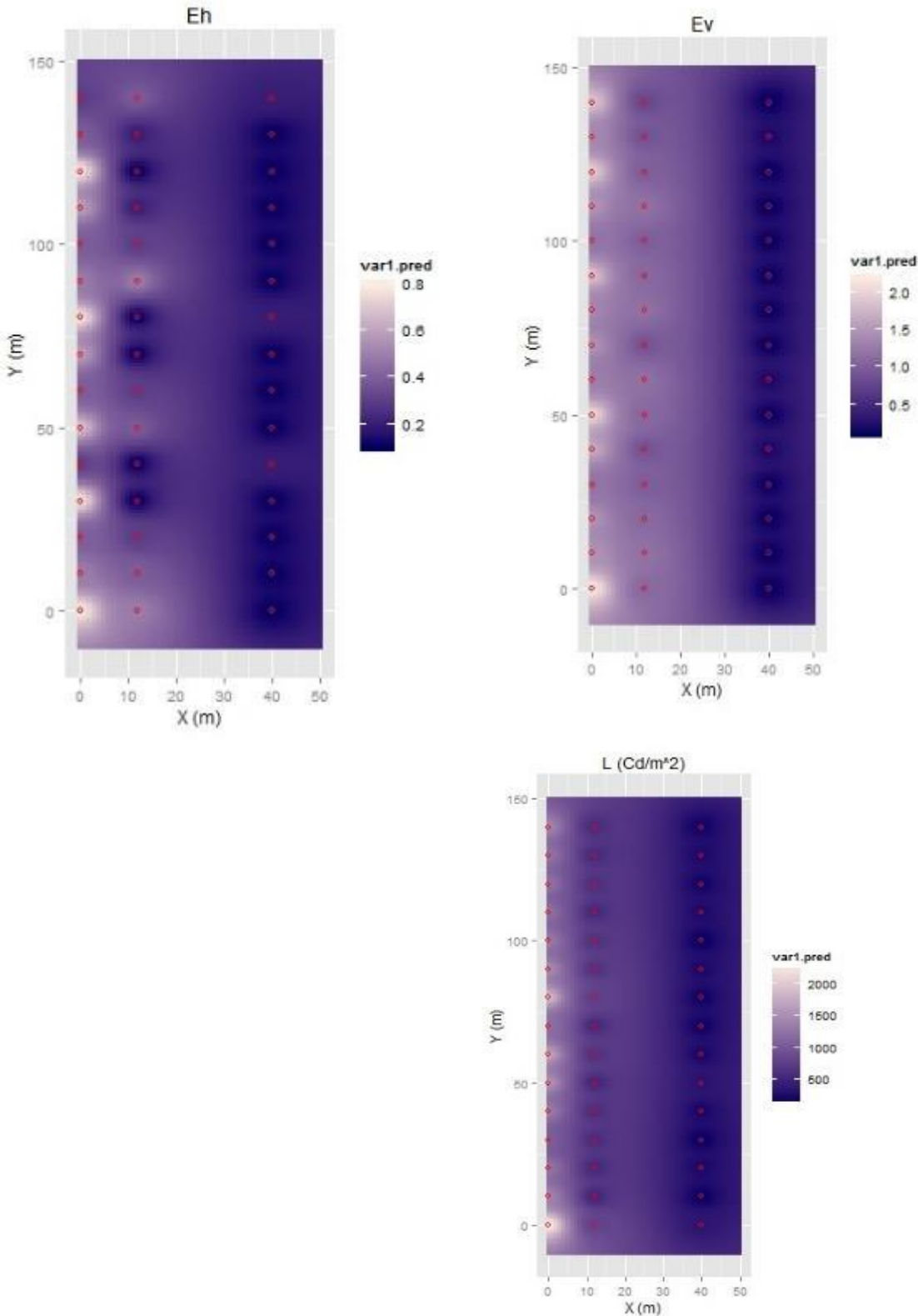


Figura 5.6. Representación de niveles lumínicos en zona medida.

5.1.3 Catálogo de especies.

Está fuera del alcance del proyecto, pero se ha realizado una catalogación de especies sensibles, para determinar cuáles pueden ser afectadas por la problemática. Se ha realizado a modo ilustrativo para garantizar la viabilidad de esta acción, necesaria en toda consideración de análisis ambiental. Se adjunta en Anexo D.

5.2 P. N. Aracena.

El Parque Nacional de Aracena y Picos de Aroche está situado en la provincia de Huelva, al norte de la ciudad de Sevilla y es la parte más occidental de la Sierra Morena. Se trata de un paraje rural con núcleos de población en su mayoría pequeños, y que forman parte de la Reserva Starlight de Sierra Morena (ELPAIS 2014) Dispone de una serie de puntos muy oscuros y parajes naturales de gran calidad.

5.2.1 Medidas experimentales.

Para este entorno sólo se han analizado especies protegidas, niveles de fondo de cielo con SQM-LU-DL en vehículo y medidas mediante ASTMON. A continuación se ilustran los recorridos realizados en vehículo.

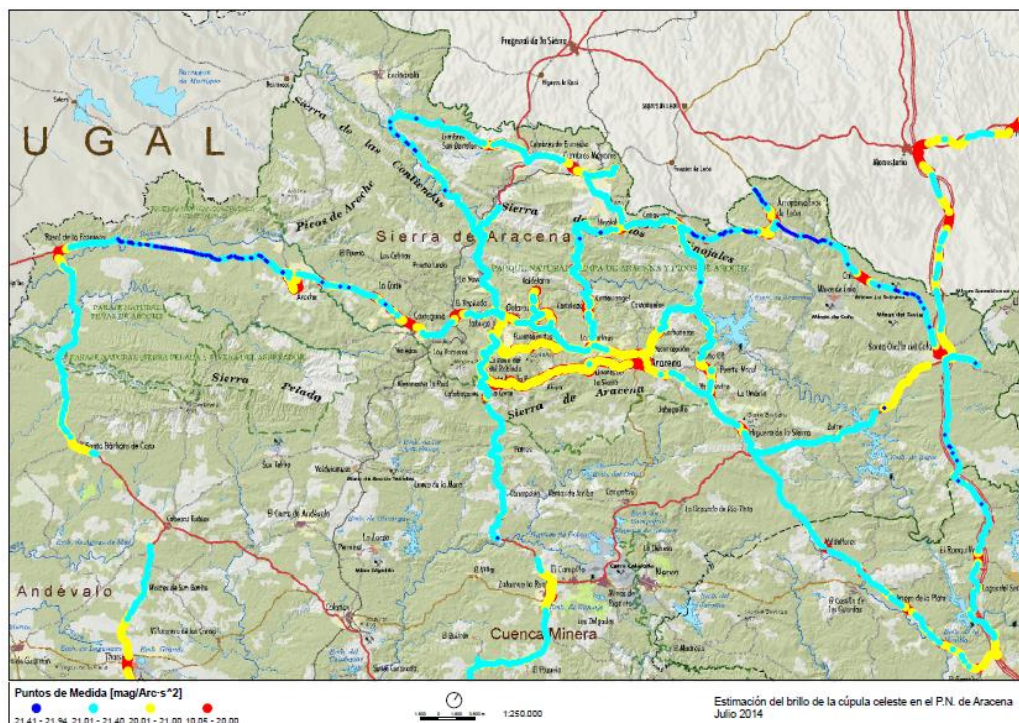


Figura 5.7. Toma de datos en P.N. Aracena y Picos de Aroche

Se puede observar efectivamente que la zona más oscura y con menos repercusiones medioambientales es la noroeste. Llegando a valores superiores a 21,4 mag/arc-sec², consideradas de alta calidad astronómica, y en el caso de la Fundación Starlight, suficiente para ser declarada Reserva Natural

5.3 Sección norte del Delta del Ebro.

El Parque Natural del Delta de l'Ebre ha sido un campo de investigación de la CL por parte del Grupo de Estudis Luminotècnics desde el año 2008. A la tesis del Dr. Hector Solano Lamphar (Solano Lamphar 2010), cabe mencionar la colaboración de la Universitat Politècnica de Catalunya con el Ajuntament de Deltebre para el control de su alumbrado y diversas mediciones y experiencias que en él se están desarrollando.

Descripción de proceso de medida:

Se han desarrollado diferentes análisis independientes, ANTES y DESPUÉS de la reforma de una serie de renovación de las instalaciones:

1. Determinación de la fuente contaminante mediante el reconocimiento exhaustivo de las instalaciones de alumbrado.
2. Análisis de la afectación de la renovación de instalaciones, con medidas de fondo de cielo con el dispositivo manual. Las medidas se hicieron entre los años 2013 y 2014.
3. En análisis de la afectación en el brillo del cielo ANTES Y DESPUES de la entrada en funcionamiento de la regulación del flujo luminoso de las instalaciones de alumbrado. Las medidas se realizaron en noviembre de 2014.
4. Análisis del fondo de cielo desde un punto alejado 5 km., del núcleo principal.
5. Colaboración con la Universidad de Santiago de Compostela y la Universidad Complutense de Madrid para determinar la variación de las imágenes tomadas por el sensor VIIRS equipado en satélite orbital.

En general, los datos más representativos han sido publicados (Estrada-García, García-Gil et al. 2015).

5.3.1 Magnitud de foco contaminante.

El cálculo y dimensión del foco contaminante, se ha desarrollado en colaboración con Ramón Estrada, el Ajuntament de Deltebre y la Empresa de Servicios Energéticos ELECNOR, presente en el municipio. El resultado ha dado como resultado una disminución teórica del UUF (E.F.S. total del municipio):

Núcleo de población	Reducción flujo lumínico emitido al cielo según modelo
#14 Deltebre	56,5%
#15 Riumar	67,2%

Tabla 5.3 Predicción de disminución del flujo lumínico emitido por los dos núcleos de población de Deltebre

5.3.2 Medidas experimentales.

La recogida de datos con Sky Quality Meter ha obtenido diferentes resultados. Aquí se muestran algunos:

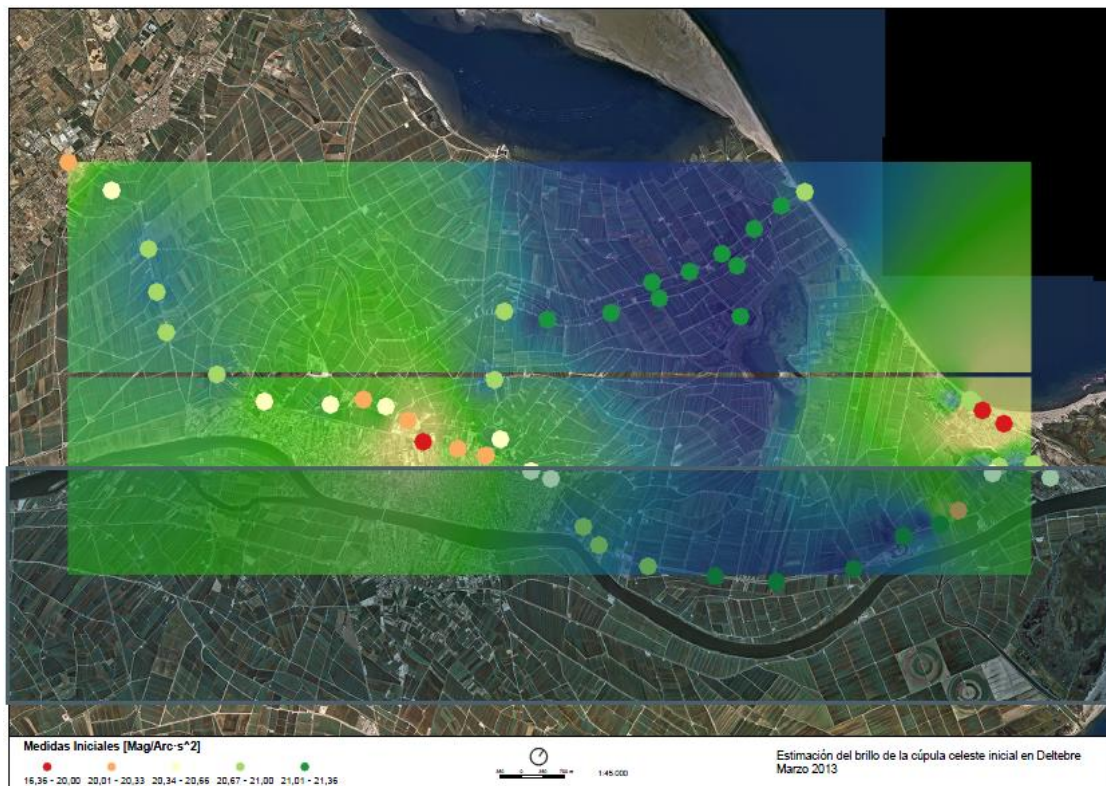
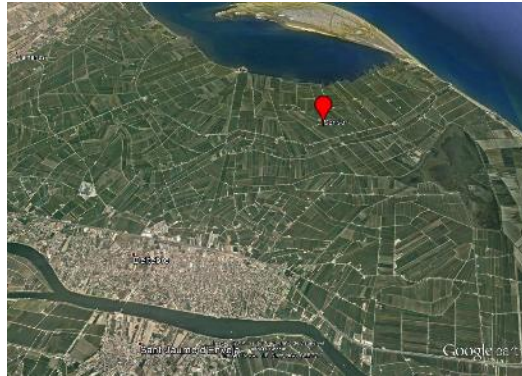


Figura 5.8. Ejemplo de primeras medidas de extensión geográfica realizadas en todo el Delta del Ebro

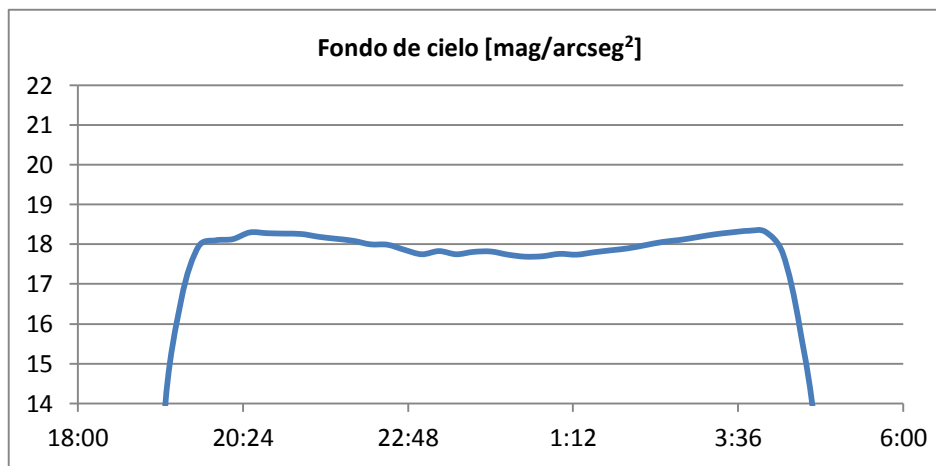
Ubicación: Delta del Ebro

Período de recogida: 06/05/2013 al 13/10/2013

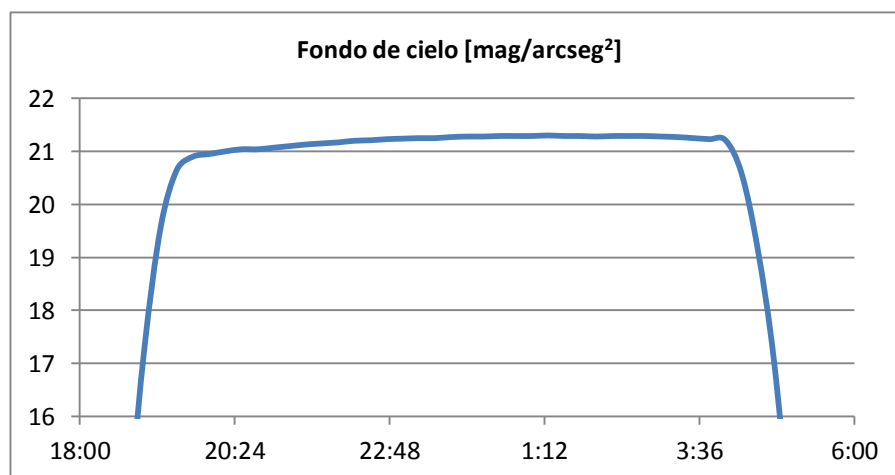
Ubicación: A 5 kilómetros del núcleo de población.



Medida representativa de noche con nubes: Noche del 21/8/2013 al 22/8/2013



Medida representativa de noche oscura: Noche del 9/9/2013 al 10/9/2013



Evolución de los máximos de cada noche:

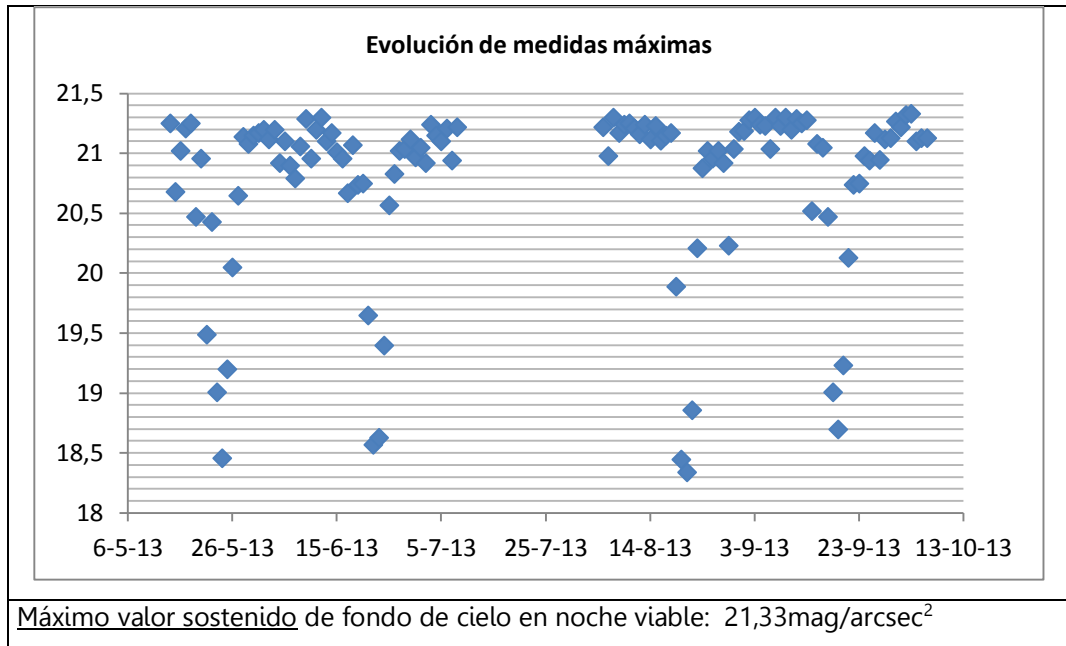


Tabla 5.4 Ficha tipo de medidas de fondo de cielo en ubicación: Deltebre

En general, no se alcanzan a ver diferencias muy importantes y debe realizarse un trabajo más extenso y repetitivo, a la vez que poder controlar las fuentes de emisión de alumbrado no público.

5.3.3 Análisis vía satélite.

El análisis de datos por satélite, realizado por la Universidad Santiago de Compostela y Universidad Complutense de Madrid, obtuvo los siguientes resultados:

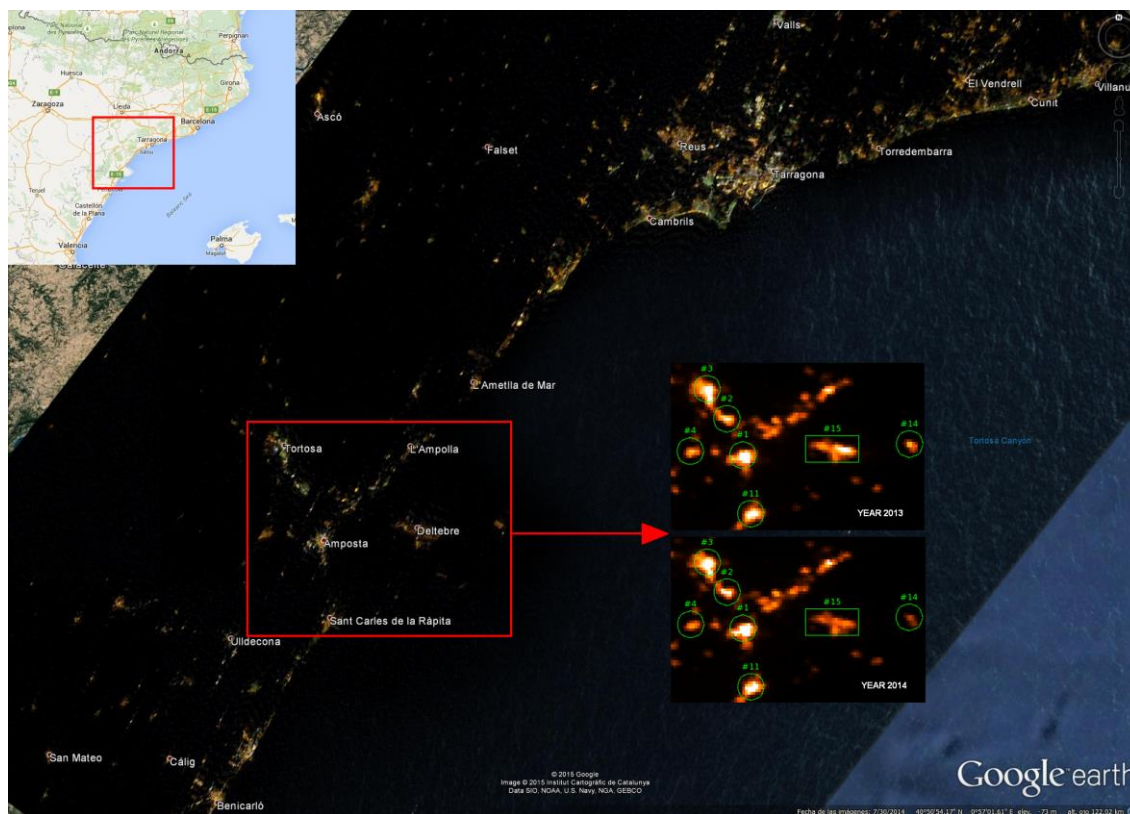


Figura 5.9. Ilustración de las mediciones realizadas en Deltebre (años 2013 y 2014)

Núcleo de población	Reducción flujo lumínico emitido al cielo según modelo	Reducción de radiancia según imagen por satélite
#14 Deltebre	56,5%	50,8%
#15 Riumar	67,2%	66,9%

Tabla 5.5 Comparación de resultados finales obtenidos en Deltebre y Riumar.

Resultados muy ajustados a los resultantes del modelo de predicción. De todas formas en este caso de análisis, sólo se pudo analizar el flujo lumínico emitido, puesto que el espectro de emisión era prácticamente el mismo en la etapa anterior y posterior (principalmente lámparas de vapor de sodio a alta presión).

5.3.1 Catálogo de especies.

Está fuera del alcance del proyecto, pero se ha realizado una catalogación de especies sensibles, para determinar cuáles pueden ser afectadas por la problemática. Esta puede consultarse en el trabajo dirigido por el autor, desarrollado por M. Concepción Gómez Fernández (Gómez Fernández 2015))

5.4 Viviendas y hábitat humano.

Las mediciones realizadas en viviendas han sido de dos tipologías:

- Verificación con luxómetro de niveles realizados mediante cálculo luminotécnico.
- Fotografía digital para poder determinar niveles de luz intrusa en fachada.

Las dos tipologías de mediciones presentan errores por los numerosos elementos de interferencia. Pese a ello, el valor necesario para determinar un problema fisiológico en el descanso es elevado, por lo que como aproximación al problema se considera como válido. Sobre todo en comparación con el único método realmente fiable y riguroso, que es la medida de nivel de iluminancia real en vertical en la ventana. Este método es de operativa muy compleja, y de elevadas necesidades económicas.

En el Anexo K se presentan resultados del análisis fotográfico y una tabla con datos de valores máximos calculados en fachadas, en función de la implantación del alumbrado y la tipología urbanística de la vía. Este valor de nivel máximo tiene como objetivo detectar situaciones potenciales de molestia, bajo un criterio proteccionista del entorno de descanso.

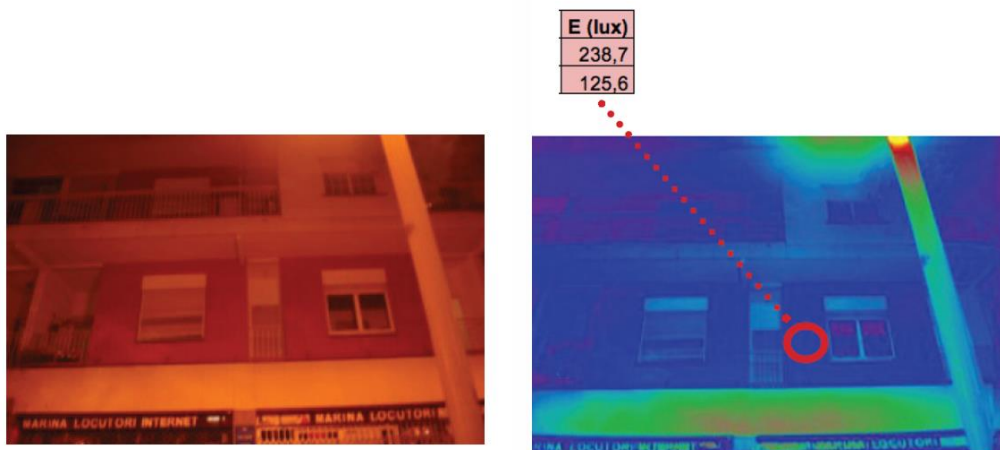


Figura 5.10. Ejemplo de análisis de luz intrusa a 5 metros de altura en Barcelona (Casas Fernandez 2015).

Para los cálculos luminotécnicos, verificados mediante luxómetro en situaciones de acceso factible, el método es análogo al de cualquier otro proyecto de iluminación.

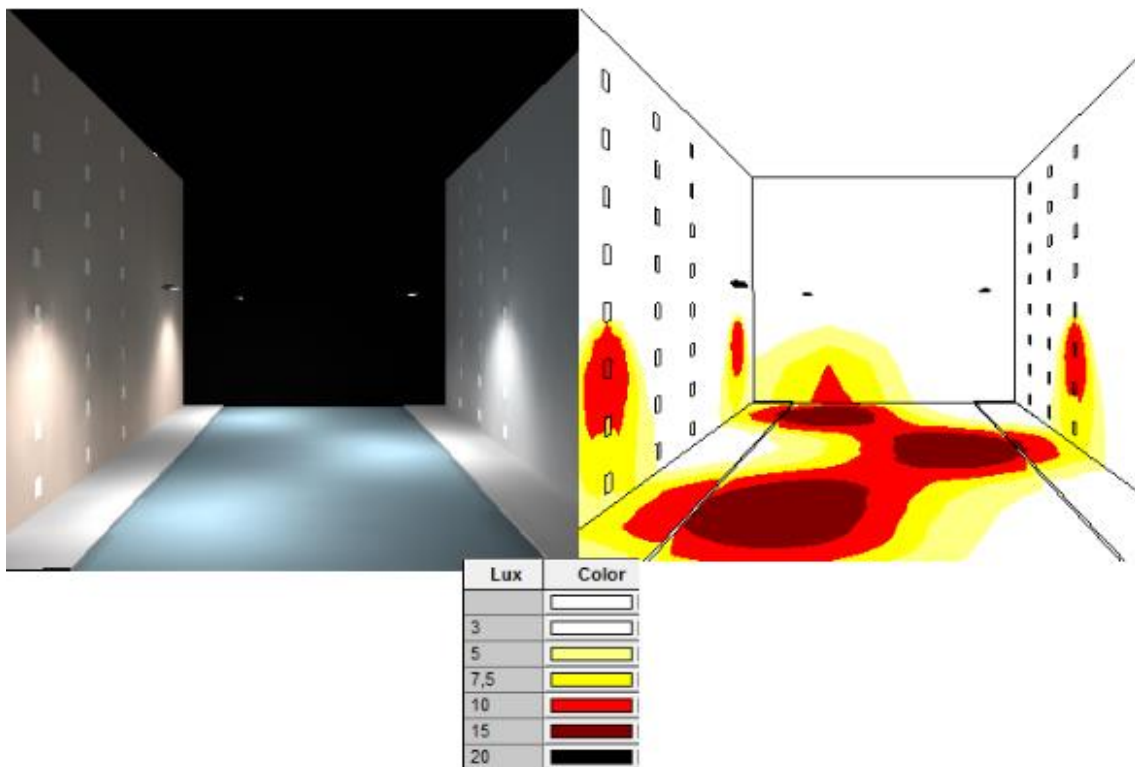


Figura 5.11. Ejemplo cálculo luminotécnico de cálculo de luz intrusa.

De la realización de múltiples cálculos y ensayos, se obtienen los datos del Anexo K. Algunos datos se pueden ver a continuación:

Código	Altura edificios [m]	Tipo de luminaria	Altura punto de luz[m]	Tipo de lámpara	Potencia de las lámparas [W]	Luz intrusa máxima sobre 4 metros [lx]
M-F-VM250-02-100	7	F	6	VM	250	312,89
M-F-VM250-01-100	7	F	6	VM	250	254,22
M-F-VM250-09-100	16	F	6	VM	250	249,78
M-F-VM250-08-100	16	F	6	VM	250	249,60
M-F-VSAP150-03-100	11	F	7	VSAP	150	235,73
M-F-VM250-07-100	11	F	7	VM	250	208,53
M-F-VM250-03-100	10	F	6	VM	250	206,22
M-F-VSAP150-01-100	7	F	6	VSAP	150	196,44
M-F-VSAP100-05-100	7	F	6	VSAP	100	166,09
M-F-VSAP100-01-100	11	F	7	VSAP	100	148,09
M-F-VSAP100-02-100	10	F	6	VSAP	100	146,93
M-F-VM250-10-100	13	F	6	VM	250	136,06
M-F-VSAP70-04-100	7	F	6	VSAP	70	97,78
M-F-VSAP70-01-100	16	F	6	VSAP	70	97,07
M-F-VSAP70-02-100	10	F	6	VSAP	70	82,49
M-F-VM250-12-100	7	F	6	VM	250	15,68
M-F-VSAP150-02-100	16	F	6	VSAP	150	13,60
M-F-VM250-11-100	12	F	4	VM	250	10,39
M-F-VM250-04-100	7	F	6	VM	250	4,54
M-F-VM250-05-100	7	F	6	VM	250	4,25
M-F-VM250-06-100	10	F	6	VM	250	4,13
M-F-VSAP100-04-100	7	F	6	VSAP	100	3,33
M-F-VSAP100-03-100	10	F	6	VSAP	100	3,00
M-F-VSAP70-03-100	7	F	6	VSAP	70	1,82

Tabla 5.6 Extracción del Anexo K. Nivel de luz intrusa máximo calculado por encima de 4 metros en luminarias tipo F (viales con cierre plano. F.H.S.i < 1%)

En donde se puede ver el potencial problema de esta problemática, principalmente en luminarias instaladas por encima de 4,5 metros de altura, y cerca de la fachada.

5.5 Conclusiones.

A partir del análisis realizado se ha podido estudiar la viabilidad de utilizar todos los métodos experimentales en análisis de impacto con las siguientes consideraciones:

5.5.1 Respecto al equipo de medida.

Para análisis de cielo:

- El dispositivo ASTMON, como ejemplo automatizado de cámara All-Sky, presenta dificultades operativas en campo, así como de software y tratamiento posterior de los datos.

-
- Precio elevado de luxómetro clase A y cámara All-sky, por lo que puede ser un problema para su recomendación de uso generalizado.
 - Posibilidad de analizar toda la cúpula celeste mediante la cámara All-Sky, en análisis completo (no sólo cénit) del brillo del cielo. Este análisis es recomendable para zonas sensibles o puesto que la información proporcionada por el SQM es demasiado general (sólo cénit a 20° de apertura) y puede estar desestimando aspectos importantes de la problemática.
 - En el caso del análisis de cielos sensibles, la atmósfera presenta numerosas interferencias para la medida (turbulencia, partículas en suspensión, temperatura ambiente, presencia de la vía láctea...). Es por ello que en el caso de análisis de estos entornos, se debe realizar un muestreo continuo de medidas para obtener un valor válido medio y con un cierto nivel de confianza.
 - De forma que se puede considerar el uso de :
 - o Para valoración de espacios de observación ocular u observatorios amateurs: SQM-L.
 - o Para valoración de observatorios astronómicos: Uso de cámara All-Sky calibrada tanto en radiancia como en ángulo. Por su dificultad operativa, es necesario su uso por personal altamente cualificado.
 - o Para valoración de la problemática en su distribución geográfica extensa, el SQM en vehículo. Todo y que también presenta la necesidad de ubicarse donde haya vías de tránsito rodado, dejando sin medidas extensas zonas de protección natural (mirar mapas de fondo de cielo del Parque Natural de Aracena y Picos de Aroche).
 - o Para valoración de la problemática en el tiempo (variación en la noche, durante el año, y teniendo en cuenta aspectos estacionales o climatológicos, etc.). El SQM registrando datos cada 10 o 15 minutos.
 - El sensor VIIRS, ubicado en satélite, presenta limitaciones debido a como se realiza la captación de información (inclinación, espectro de emisión, etc. (Sanchez-de-Miguel 2015)). Pese a ello, se presenta como una herramienta útil, rápida de utilizar y que muestra resultados extrapolables a grandes zonas. Como reto, se presenta que su cálculo debe realizarse por personal especializado.

Para el análisis medioambiental:

- Se requiere un luxómetro clase A. El clase B no es suficiente por el requerimiento de análisis a nivel de milésimas de lux.

- Se requiere un luminancímetro clase B. Es suficiente para equiparar con los brillos nocturnos que hacen de efecto modificador en el entorno.
- Se pueden predecir efectos con cálculos luminotécnicos tradicionales.

Para el análisis de luz intrusa a vivienda:

- La posibilidad de realizar medidas con luxómetro en viviendas es multitud de ocasiones imposible operativamente. Así que la aproximación mediante cálculo luminotécnico o fotografía digital tratada es una opción a considerar.

5.5.2 Respecto a las afectaciones observadas.

De las observaciones y la relación con las afectaciones, se ha podido constatar:

- La extensión de la problemática a gran distancia. El brillo de cielo de Barcelona se extiende de forma muy importante y afecta al brillo incluso en el cénit a más de 30 km.
- La afectación del brillo del cielo al ecosistema natural, puesto que se genera un foco emisor de luz indirecto: La cúpula celeste. A esto se le denominará a partir de ahora: **afectación indirecta al ecosistema natural**. Puede tener valores cercanos al nivel lumínico de la luna en puntos cercanos a las ciudades, afectando a los seres vivos más sensibles a la luz. Las mediciones realizadas de forma experimental se pueden observar en el Anexo I. Este factor es de radical importancia en los estudios de zonas naturales protegidas y se ve muy amplificado por la cobertura de nubes, como ha sido observado experimentalmente, al igual que otros autores. La componente roja puede llegar incluso a multiplicar por 17 el factor de cielo descubierto (Kyba, Ruhtz et al. 2012, Kocifaj 2014).
- En instalaciones optimizadas, los niveles de luz intrusa para el domicilio humano son relativamente reducidos por encima de 4,5 metros. A pesar de ello deben ser estudiados con cautela.

5.5.3 A modo de conclusiones finales.

A modo de conclusiones finales de este apartado se puede decir que:

- Con la validación del material y metodología propuesta: Se puede integrar en la predicción ambiental a modo de sistema de control y seguimiento de la afectación.
- Se pueden detectar, medir y evaluar las afectaciones al entorno.
- Las afectaciones y repercusiones observadas denotan que existen diferentes tipologías de impactos en función del entorno y usuario:
 - o **Impacto Ambiental Lumínico al Cielo**: Incremento de brillo del cielo, que supone una disminución de los astros visibles. Esto puede afectar a la observación ocular o de telescopio. Teniendo diferente grado de impacto en

función de la precisión del telescopio. Se considerarán como dos diferentes repercusiones.

- **Impacto Ambiental Lumínico en el Ecosistema natural:** Introducción de iluminación intrusa. Puede afectar de dos formas: Por presencia de puntos brillantes, algunos muy elevados, e incremento de nivel lumínico en entorno originariamente oscuro. Así se considerarán estos dos impactos: De puntos brillantes y de luz intrusa.
- **Impacto Ambiental Lumínico en hábitat Humano:** Entrada de luz a zonas de descanso. El nivel es en general, relativamente bajo respecto los niveles para la reducción de melatonina. Pese a ello en, situaciones singulares los niveles pueden superar los 200 y 300 luxes en fachada, y que con lámparas de espectro de emisión rico en la componente azul, puede representar una afectación importante.

Complementariamente, existe una afectación no fisiológica, que es informativa y que recoge la reglamentación desde el inicio: Presencia de luz y que evita el sueño. Así se considerarán dos repercusiones también: Informativa y fisiológica.

6. PROPUESTA DE METODOLOGIA DE PREDICCIÓN IMPACTO AMBIENTAL.

El mejor científico está abierto a la experiencia, y ésta empieza con un romance, es decir, la idea de que todo es posible.

Ray Bradbury



6. PROPUESTA DE METODOLOGÍA DE PREDICCIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

6.1 Preliminares.

El método se ha estructurado en diferentes fases para poder abordar de la forma más clara y estructurada el análisis. También para facilitar su escalabilidad y modificación con la futura evolución del conocimiento de la problemática.

El resultado final esperado es de formato doble:

- Por una parte valores numéricos de afectación y cuantitativos del impacto esperado: Por ejemplo "El incremento de brillo de cielo en el cénit del observatorio astronómico ubicado en Vallcebre se predice en 0,1 mag/arcseg²".
- Por otra parte la valoración cualitativa: "El impacto ambiental predicho para la observación del observatorio astronómico amateur de Vallcebre es moderado". Esta permite el uso de herramientas gráficas comparación de diferentes alternativas:

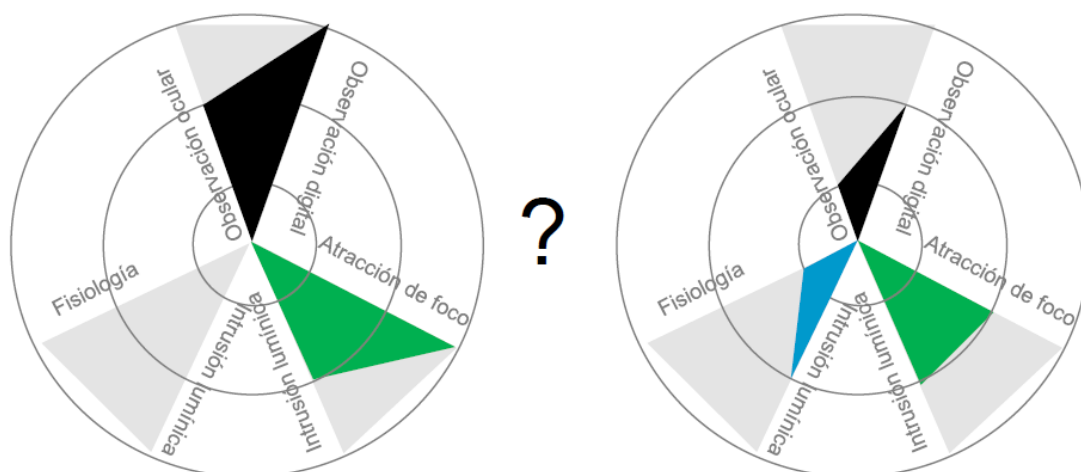


Figura 6.1 Ejemplo de valoración del Triskel del impacto de la CL (García Gil 2012)

Es importante aclarar que la variable cualitativa ha sido construida en muchos casos a partir del criterio y juicio del autor del presente documento. Su articulación tiene la función de poder mostrar su función, pero debe ser contrastada por diferentes expertos y por la evolución de la ciencia, con el objeto de poder ser integrada posteriormente en un proceso de Evaluación del Impacto Ambiental.

El método se divide en diferentes fases y etapas:

- **Fase 0. Determinar alcance del impacto:** La naturaleza de la problemática hace que el alcance pueda ser de una gran extensión. Pero para evaluar el impacto hay que tener en cuenta la posible fragilidad de los entornos próximos. Es decir, si hay zonas de observación astronómica de carácter profesional a una cierta distancia, ¿a partir de qué

tipo de reforma de instalaciones hay que hacer una evaluación de impacto? ¿Si la reforma es de poca magnitud y está a 20 km? ¿Y si la reforma es de todo un municipio y está a esos mismos 20 km?

En esta fase se proporcionan herramientas para determinar este alcance de relacionado con el resplandor luminoso y el impacto indirecto a los ecosistemas.

- Fase 1. Identificar los entornos de análisis y su sensibilidad: A partir de la determinación de la fase 0, clasificar los entornos en función de su fragilidad y sensibilidad, con la denominación:

Exy. Entorno XY

Donde:

“x” será el tipo de entorno en función de su usuario afectado y pudiendo ser: H: Humano; E: Ecosistema; C: Cielo

“y” será una nomenclatura entre 0-3. Siendo 0 un entorno donde no se realiza evaluación, 1 el más sensible y 3 el menos sensible.

Debido a la gran extensión que puede tener el efecto contaminante, pueden existir diversos entornos a analizar para cada proyecto o gran proyecto luminotécnico.

- Fase 2. Caracterizar y determinar magnitud del foco contaminante: Se calcula la magnitud del foco (normalmente en lúmenes contaminantes) y sus características (normalmente la tipología genérica de espectro de emisión).
- Fase 3. Calcular la afectación ambiental: A partir de los métodos escogidos en cada caso, se procede a evaluar la afectación en cada situación: Variación de nivel lumínico en ecosistema o vivienda y variación de brillo de cielo nocturno.
- Fase 4. Determinar el impacto ambiental: Por último, determinar el impacto ambiental esperado, normalmente a partir de la comparación de la afectación ambiental determinada en la fase anterior, comparada con unos valores umbrales en función de la sensibilidad del entorno analizado.

A continuación se muestra el diagrama general estructurado de la metodología propuesta:

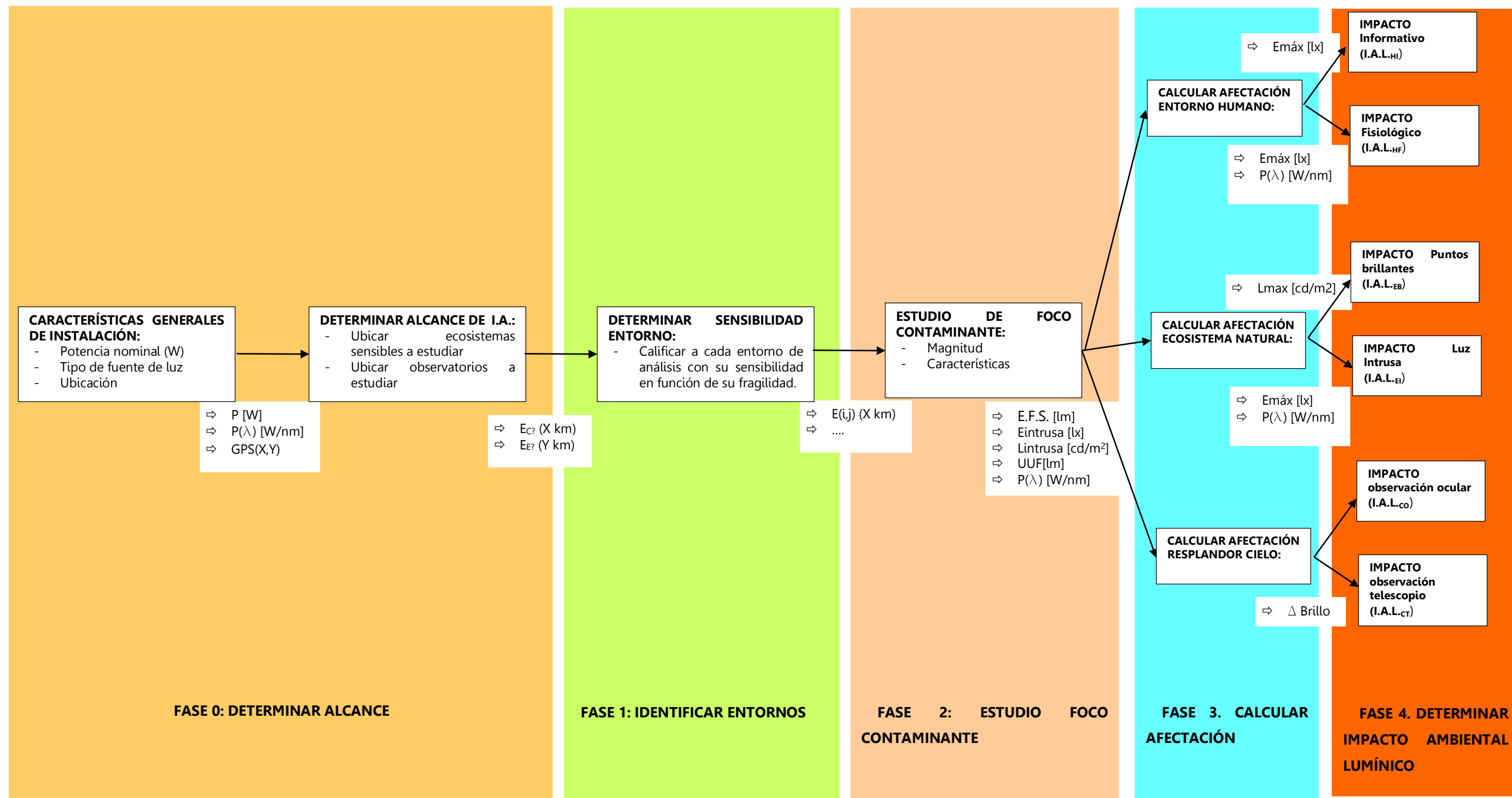


Figura 6.2 Estructura general de la propuesta de metodología de predicción del Impacto Ambiental Lumínico

6.1 Fase 0. Determinar alcance del impacto.

El objetivo de esta fase es determinar la profundidad y el alcance de la predicción. Para ello se propone una herramienta de análisis **preliminar**. Hay dos etapas claramente diferenciadas.

6.1.1 Determinar las características principales de la instalación.

Una vez se tiene el proyecto determinado, o la instalación a la que se quiere someter a impacto ambiental, se necesita información de fácil obtención, para su análisis preliminar. Esta información es:

- Potencia nominal de las fuentes de luz utilizadas. En vatios [W].
- Ubicación de la instalación

Con esta información se debe obtener el impacto potencial en los entornos próximos más susceptibles de ser afectados. Esto se analiza en la siguiente etapa:

6.1.2 Predicción del alcance del impacto ambiental.

Conociendo la ubicación y su potencia, se consultan las siguientes gráficas:

Preliminar: Variación de oscuridad de cielo a 45° del Cénit en función de la potencia nominal y la distancia de observación:

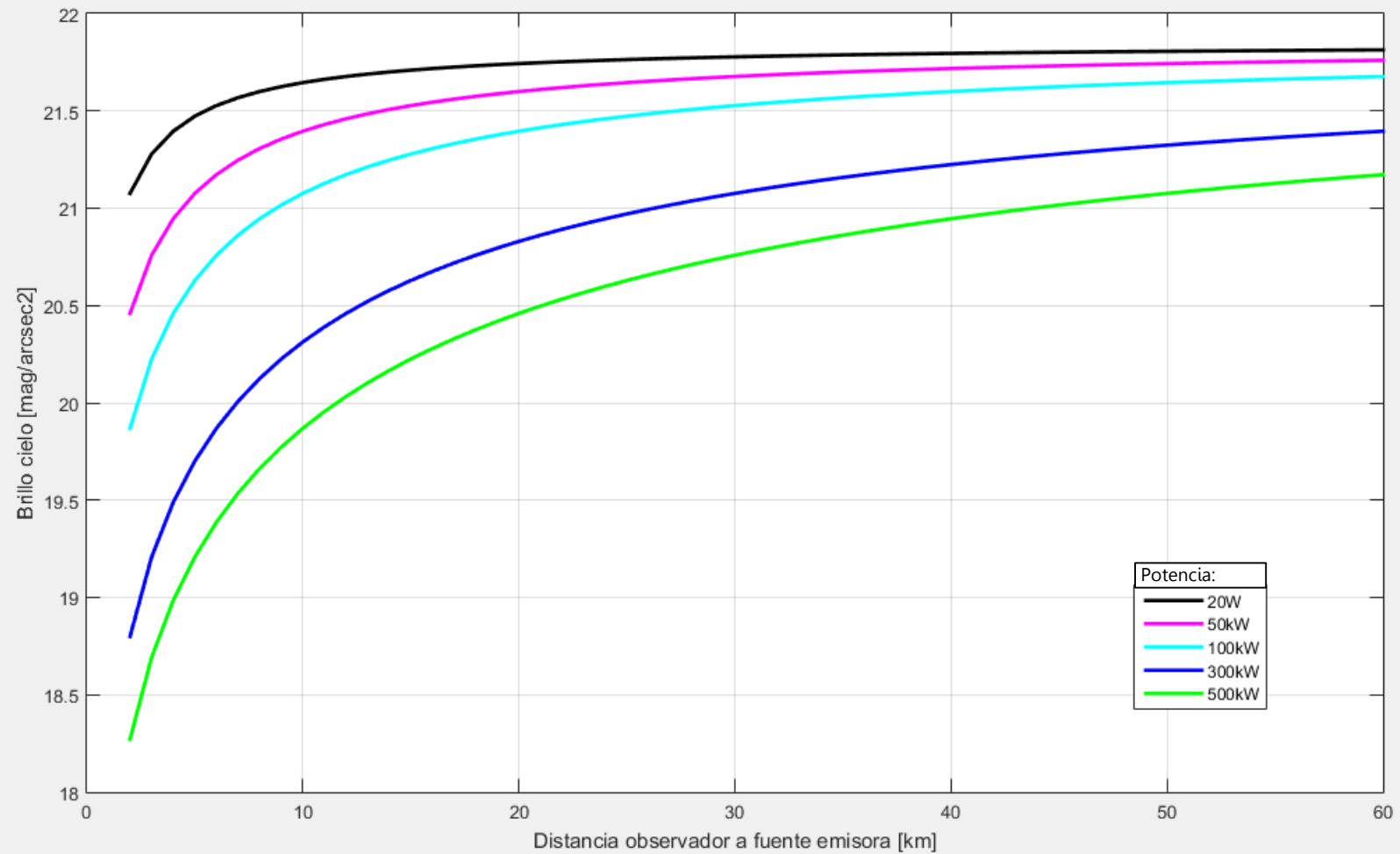


Figura 6.3 Predicción PRELIMINAR del impacto ambiental potencial para observatorios astronómicos. Elaboración propia a partir de modelo (Kocifaj 2007)

Este gráfico proporciona información **PRELIMINAR** de cuanto es el brillo del cielo de determinada zona situada a una distancia "d" (en km), para una potencia nominal kW. En todo caso, para la realización de una predicción más ajustada, se debe realizar en la fase 3 de este método.

Siguiendo un criterio proteccionista, se ha sobrevalorado la posibilidad de riesgo potencial de análisis. En este sentido se ha considerado que:

- El flujo total instalado en lúmenes es de una eficacia media de 100 lm/W.
- Que para el flujo total contaminante incluido se multiplica por F_u según (Estrada-García, García-Gil et al. 2015) de un 12%. Factor adecuado según urbanismo de las zonas estudiadas y sistemas de iluminación modernos (F.H.Si considerado 10%): Es decir para instalaciones diseñadas de forma reglamentaria.
- El tipo de luz utilizado es correspondiente a un espectro de emisión de LED temperatura de color de unos 4000K.
- El dato de brillo en el cielo es a 45° del cénit. Un dato obtenido a criterio del investigador, siguiendo los de algunos investigadores tradicionales (Walker 1977).

Algunas formas de leer el gráfico en función de la información deseada sería:

- Se está desarrollando una instalación de 50 kW. Cualquier centro de observación ubicado a menos de 13 km, verá descendida su oscuridad de cielo por debajo de 21,5 mag/arcsec² respecto a la natural (21,85 mag/arcsec⁻²).
- Si hay un observatorio de gran calidad, cualquier instalación más de 100 kW y a menos de 27 km le puede reducir su brillo de fondo de cielo por debajo de 21,5 mag/arcsec⁻² respecto a la natural (21,85 mag/arcsec⁻²).

De forma análoga a la anterior, y para determinar la predicción de entornos protegidos afectados por el resplandor luminoso, en lo que se ha denominado afectación indirecta al ecosistema natural en el apartado 5.5 Conclusiones del trabajo de campo, tenemos:

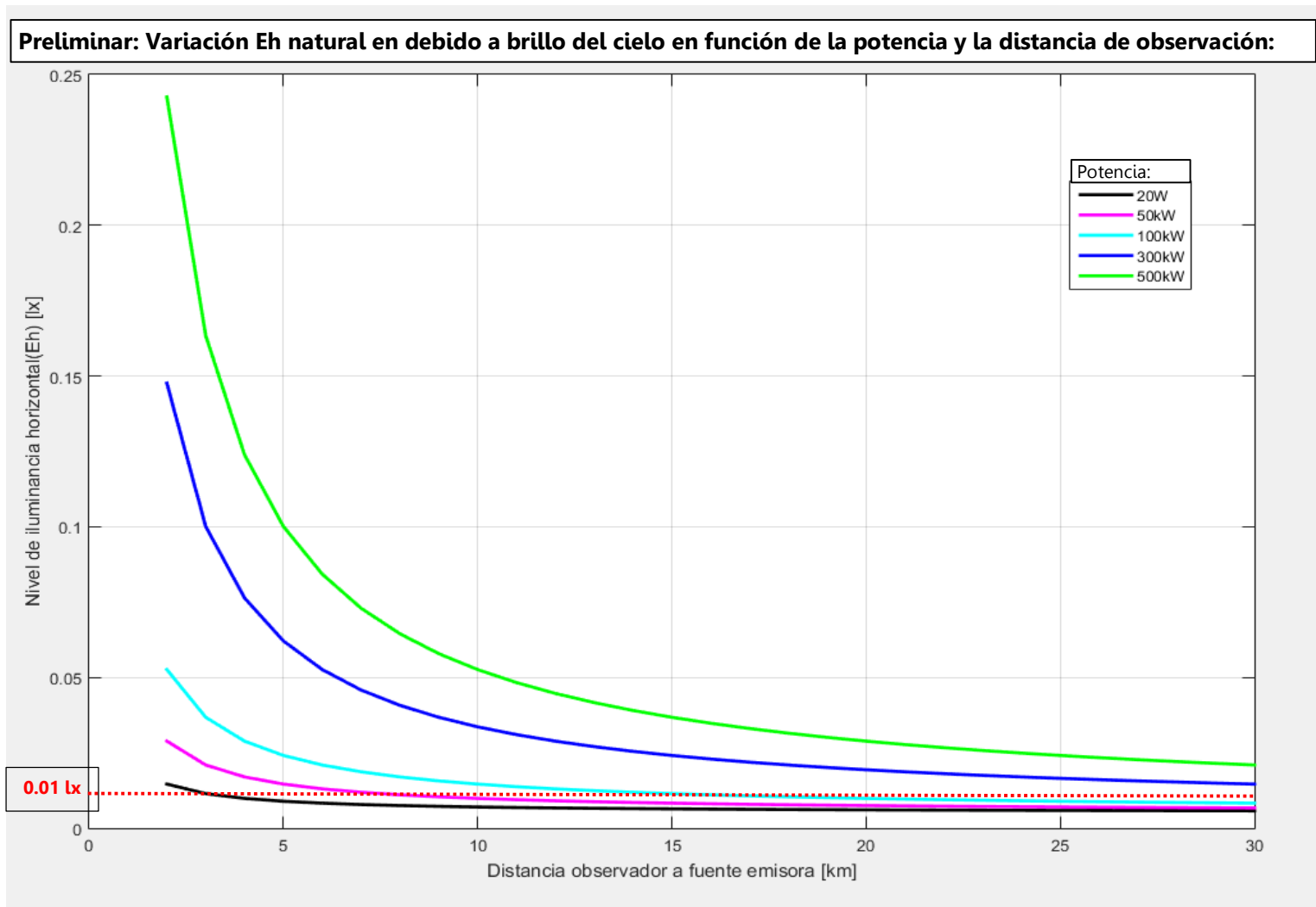


Figura 6.4 Predicción PRELIMINAR del impacto ambiental potencial para ecosistemas. Elaboración propia a partir de modelos (Kocifaj 2007, Kocifaj 2014, Kocifaj and Solano 2014)

Este gráfico proporciona información **PRELIMINAR** de cuanto es nivel lumínico intruso [lx] en un ecosistema. Se analiza cuando este es debido a la afectación indirecta (tomando el cielo como emisor lumínico) en zona situada a una distancia "d" (en km), para una potencia nominal kW. En todo caso, para la realización de una predicción más ajustada, se debe realizar en la fase 3 de este método.

Siguiendo un criterio proteccionista, se ha sobrevalorado la posibilidad de riesgo potencial de análisis. En este sentido se ha considerado que:

- El flujo total instalado en lúmenes es de una eficacia media de 100 lm/W.
- Que para el flujo total contaminante incluido se multiplica por F_u según (Estrada-García, García-Gil et al. 2015) de un 12%. Factor adecuado según urbanismo de las zonas estudiadas y sistemas de iluminación modernos (F.H.Si considerado 10%): Es decir para instalaciones diseñadas de forma reglamentaria.
- El tipo de luz utilizado es de temperatura de color blanco neutro, correspondiente a un espectro de emisión de LED Temperatura de color de unos 4000K.
- El dato de brillo en el cielo es a 0° del cénit y un factor de conversión $R=2\cdot\pi$ como poco favorable (Kocifaj and Solano 2014).
- Se ha tenido en cuenta un AF (Factor Amplificador de las nubes), de 8,16, según (Kocifaj 2014), pese a que experimentalmente se han encontrado de hasta 17,6 (Kyba, Ruhtz et al. 2012) y en trabajo experimental propio, superior a 9 (en algunos trabajos representados en el Anexo F).

La forma de leer el gráfico es análoga al gráfico anterior. Por ejemplo: Para una instalación de 300 kW, esta puede **generar hasta** 0,02 lx un entorno natural situado a 20 km. Se muestran valores niveles máximos, teniendo en cuenta los valores aumentativos de las nubes.

Fase 1. Identificar los entornos de análisis y su sensibilidad.

Una vez identificado el alcance del estudio del impacto, se clasificarán los entornos según su sensibilidad. Cada uno de los entornos quedará enumerado, calculada su distancia y ubicación al foco contaminante.

Se propone continuar con la nomenclatura clásica E1, E2, E3, E4, pero de la siguiente forma:

6.1.3 Entornos de hábitat humano.

La clasificación propuesta será la siguiente:

Zonificación clásica	Descripción	ZONIFICACIÓN PROPUESTA
E1	Son las zonas más restrictivas, de máxima protección frente a la CL. Corresponden a las áreas coincidentes con los espacios de interés natural, las áreas de protección especial, zonas de protección de aves, observatorios astronómicos...	E_{h0}
E2	Corresponden al suelo no urbanizable fuera de un espacio de interés natural, a las áreas de protección especial. Son las zonas periurbanas o los extrarradios de las ciudades.	E_{h0}
E3	Son las áreas que el planeamiento urbanístico cualifica como suelo urbano o urbanizable. Son zonas residenciales donde la calzada, las vías de tráfico rodado y las aceras están iluminadas.	E_{h1}
E4	Son áreas en suelo urbano de uso intensivo en actividades por la noche: vías comerciales, industriales o de servicios y también viales urbanos principales. Incluyen centros urbanos, zonas residenciales, sectores comerciales y de ocio con elevada actividad durante la franja horaria nocturna.	E_{h1}

Tabla 6.1 Zonificación típica de las reglamentaciones de CL (García Gil, San Martín Paramo et al. 2012) y basado en la Norma CIE-150 (CIE 2003) y CIE-127 (CIE 1997)

Donde:

- E_{h0} corresponde a una clasificación que indica que no hay viviendas o similares, por lo tanto no se procederá a la evaluación
- E_{h1} corresponde a una clasificación que indica que existen viviendas y hay potencial impacto que debe ser evaluado. Tradicionalmente, zonas E3 y E4.

6.1.4 Entornos naturales según la sensibilidad.

En este caso la clasificación de referencia es la mostrada en el Light Pollution Handbook:

<i>Zonas ambientales</i>	<i>Ejemplo de subzona</i>	ZONIFICACIÓN PROPUESTA
E1	Áreas básicamente con paisajes oscuros	E_{E1}
E1a	- Reservas naturales	
E1b	- Parques nacionales	
E1c	- Áreas de especial belleza y protección	
E2	Áreas de bajo brillo: rurales, agricultura, residenciales.	E_{E2}
E3	Áreas de brillo medio	E_{E3}
E3a	- Áreas residenciales suburbanas	
E3b	- Áreas residenciales urbanas	
E4	Áreas de alto brillo	E_{E0}
E4a	- Zonas urbanas con actividades residenciales, industriales... considerable actividad nocturna	
E4b	- Ciudad y áreas metropolitana de uso recreacional con alta actividad nocturna	

Tabla 6.2 Descripción de subzonas medioambientales. Traducción del autor a partir de la fuente (Narisada and Schreuder 2004)

Donde:

- E_{E1} corresponde a espacios naturales protegidos, parques nacionales, o similar. Poseen una biodiversidad especial y abundancia de flora y fauna de actividad nocturna.
- E_{E2} corresponde a zonas rurales, de agricultura o espacios rurales o bosques no especialmente protegidos. Pese a ello puede disponer de ecosistemas de actividad nocturna que deben analizarse.
- E_{E3} espacios naturales muy cercanos a zonas urbanas, o incluso dentro. Zonas poco oscuras, pero con presencia de ecosistemas nocturnos, especialmente bajo cobertura vegetal.
- E_{E0} Zonas de alta actividad ciudadana, ocio, etc. Centro de grandes ciudades, complejos comerciales, etc. Los espacios naturales en su interior están altamente degradados y a menudo son introducidos artificialmente por el hombre.

6.1.5 Observatorios del cielo según su sensibilidad.

En este caso la clasificación de referencia también es la mostrada en el Light Pollution Handbook:

<i>Zonas</i>	<i>Ejemplo de subzona</i>	ZONIFICACIÓN PROPUESTA
E1	Áreas básicamente con paisajes oscuros	
<i>E1a</i>	- Observatorios de categoría mundial	-
<i>E1b</i>	- Observatorios internacionales o nacionales	E_{C1}
<i>E1c</i>	- Observatorios de investigación académica de importante categoría	
E2	Observatorios de nivel para postgraduados	E_{C2}
E3	Áreas de brillo medio	E_{C3}
<i>E3a</i>	- Observatorios amateurs importantes	
<i>E3b</i>	- Observatorios amateurs recreacionales	
E4	Áreas de alto brillo	E_{C0}
<i>E4a</i>	- Visión de estrellas a simple vista	
<i>E4b</i>	- Visión de estrellas a simple vista, de los astros más brillantes	

Tabla 6.3 Descripción de subzonas para actividades astronómicas. Traducción del autor a partir de la fuente (Narisada and Schreuder 2004)

Donde:

- E_{C1} corresponde a espacios naturales protegidos, parques nacionales, o similar. Poseen una oscuridad del cielo muy cercana a la natural y se han instalado telescopios de nivel nacional.
- E_{C2} corresponde a zonas oscuras, donde hay una buena visión de la cúpula celeste y se han podido destinar a ellas telescopios de segundo nivel.
- E_{C3} espacios muy cerca de zonas urbanas, incluso dentro. Destinados a la observación de estrellas e instalación de telescopios de nivel amateur.
- E_{C0} Zonas de alta actividad ciudadana, ocio, etc. Centro de grandes ciudades, complejos comerciales, etc. La observación de estrellas ha quedado a nivel esporádico. El estudio del impacto en estas zonas se desestima.

Nota: Los grandes telescopios de categoría mundial no están dentro del alcance de esta metodología, y requieren estudios más personalizados (Aubé and Kocifaj 2012).

6.2 Fase 2. Caracterizar y determinar la magnitud del foco contaminante.

Una vez determinado el alcance de la evaluación y la clasificación de los entornos a analizar, se procede al proceso de cálculo. A partir de ahora se van a utilizar herramientas de la bibliografía e ingeniería luminotécnica:

Lo primero va a ser realizar un cálculo de la magnitud del foco contaminante para ello se necesitan conocer los siguientes valores:

- ⇒ Magnitud del foco contaminante [lm]. Se puede utilizar la metodología RAMA-L para proyectos simples o el cálculo del UUF para zonas urbanas extensas (García Gil 2009, Estrada-García, García-Gil et al. 2015).
- ⇒ Espectro de emisión de la fuente de luz: En irradiación por cada franja del espectro. Se asociará una a cada tipo de lámpara, por ejemplo según estudios previos realizados por la Universidad Complutense de Madrid.

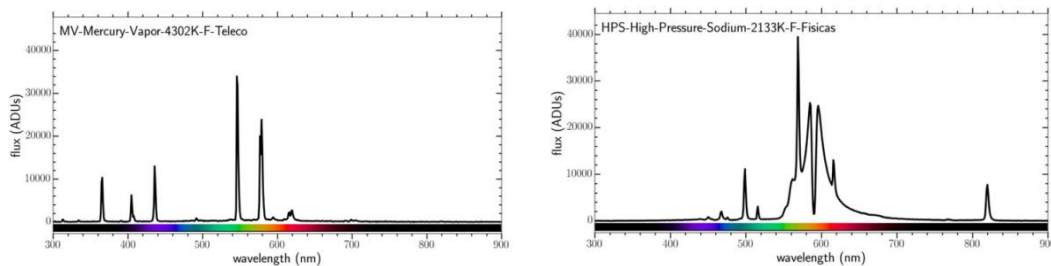


Figura 6.5 Diferentes espectros de emisión (Tapia, Sanchez de Miguel et al. 2015).

Por supuesto, es necesario conocer con detalle el proyecto o instalación luminotécnica a analizar:

- Potencia y tipología de cada lámpara.
- Implantación y tipología de luminaria.
- Gestión en el tiempo (encendidos, apagados, reducción).
- Entorno más directo de implantación: Fachadas, vegetación...
- Etc.

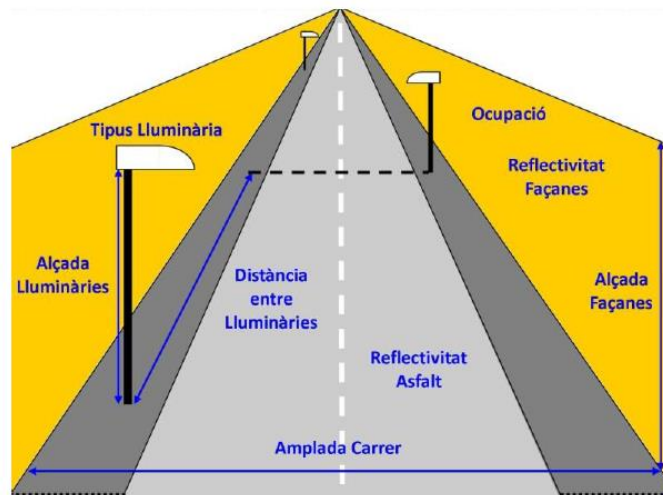


Figura 6.6 Instalación típica de alumbrado exterior y sus variables para el estudio (Estrada Garcia 2013).

También es necesario conocer aspectos de intrusión lumínica directa. Estos se calculan y delimitan de forma tradicional mediante el proyecto luminotécnico y mallado en las zonas de estudio. Se explicitan en el apartado posterior.

6.3 Fase 3. Calcular la afectación ambiental.

El cálculo de la afectación medio ambiental también se desarrollará a partir los datos obtenidos.

Esa se divide en:

6.3.1 Afectación al entorno humano.

Para ello es necesario conocer

- ⇒ Nivel de iluminación que se introduce en las zonas de descanso y reposo.
- ⇒ Espectro de emisión de la fuente contaminante, caracterizado por el tipo de lámpara utilizado.

La determinación se puede hacer por medida de nivel lumínico en el caso de una instalación ya existente, o mediante cálculo luminotécnico. En este segundo caso, y como se ha comentado en el apartado 5.4. Viviendas y hábitat humano, se escoge un criterio proteccionista, y se calcula el nivel de iluminancia máximo posible en la superficie (fachada) a partir de 4 metros. Este criterio no tiene en cuenta la existencia de ventanas, si no "el potencial" de existencia de ventana.

En el caso de conocer su ubicación debe considerarse así. Tal como describen los apartados 4 y 5:

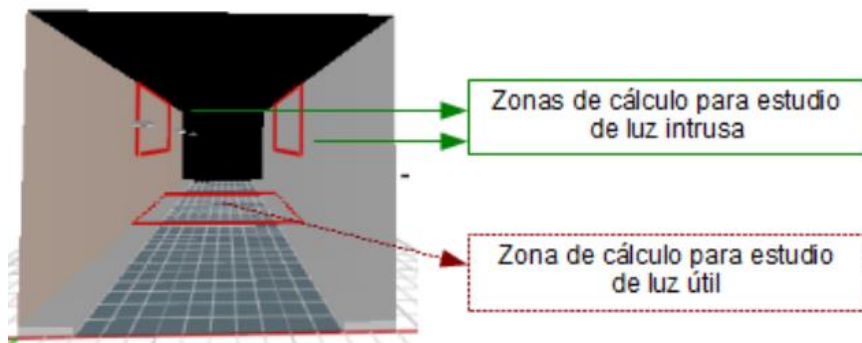


Figura 6.7 y 6.8 Método de cálculo de luz intrusa en domicilios a partir de programas de cálculo lumínico

6.3.2 Afectación a ecosistemas.

La afectación a los ecosistemas es doble: Por una parte la existencia de puntos brillantes, y por otra parte la luz intrusa al ecosistema. Pese a la propuesta de variables y umbrales, no existe una clasificación global de animales para determinar que para todo un ecosistema la luz afectará de la misma forma. Los animales en general tienen sistemas visuales muy diferentes y los hay de comportamiento diurno, nocturno y crepuscular. Hay comportamientos parecidos en cuanto al agrupamiento de algunos de estos, pero al final, es necesario poder analizar cada especie en concreto. Actualmente esta circunstancia es inabordable por la magnitud de las investigaciones que serían necesarias, de forma que para poder evaluar la afectación y repercusión de la luz en los diferentes ecosistemas se ha partido de un principio de prevención, en el cual se determinan los valores umbrales como aquellos que pueden ser más problemáticos para la generalidad de los animales de comportamiento nocturno.

Para los análisis propuestos, los datos necesarios son:

- ⇒ Nivel de Luminancia en cd/m^2 (punto brillante) medido o calculado a menos de 500 metros y visibles.
- ⇒ Espectro de emisión de la fuente contaminante, caracterizado por el tipo de lámpara utilizado.
- ⇒ Nivel de luz intrusa directa (si es el caso), cuando hay una emisión procedente de la instalación. Normalmente nunca más lejana a 300 metros. Se puede realizar medida o cálculo luminotécnico. En todo caso el alcance dependerá de la magnitud, tipología e implantación del alumbrado.
- ⇒ Nivel de luz intrusa indirecta (si es el caso, debido al alcance del proyecto). Se calcula según la bibliografía (Kocifaj and Solano 2014), como un valor máximo de:

$$E_h[lx] = K \cdot L [\text{cd/m}^2]$$

En la bibliografía propone el uso del valor K entre π y $2 \cdot \pi$. Con criterio de protección, se escoge el valor de $K=2 \cdot \pi$.

Los métodos experimentales de medida o cálculo están descritos en los apartados 4 y 5.

6.3.3 Afectación a observación del cielo.

En el caso de tener que realizar una predicción del impacto de la observación del cielo, según el alcance del proyecto, se propone aplicar el Modelo de (Kocifaj 2007). Con los siguientes supuestos:

- Cielo despejado
- Dispersión atmosférica según características intrínsecas de la zona.
- Cálculo para todos los espectros de emisión desde 380 a 780 nm en visión escotópica.

El resultado de cálculo será una cifra de predicción del brillo del cielo futuro después de la ejecución del proyecto. Por lo tanto,

- ⇒ Valor de brillo de fondo de cielo en $[\text{cd/m}^2]$, o $[\text{mag/arc.seg}^2]$.

6.4 Fase 4. Determinar el impacto ambiental (fichas resumen).

El impacto ambiental se determinará en 6 vectores de análisis:

- **IAL_{HI}** Impacto Ambiental Lumínico en entorno **Humano Informativo**: Determina la dificultad de poder descansar en oscuridad, por el tener una energía luminosa del exterior.
- **IAL_{HF}** Impacto Ambiental Lumínico en entorno **Humano Fisiológico**: Determina la reducción de melatonina en nuestro organismo debido a la presencia de luz en entorno que debería estar oscuro
- **IAL_{EB}** Impacto Ambiental Lumínico en entorno **Ecosistema** debido a Puntos **Brillantes**.: Representa el potencial efecto barrera, atracción... de puntos brillantes en zonas naturales.
- **IAL_{EI}** Impacto Ambiental Lumínico en entorno **Ecosistema** debido a Luz **Intrusa**.: Define el impacto por perder la oscuridad de un entorno natural oscuro.
- **IAL_{CO}** Impacto Ambiental Lumínico en entorno **Cielo** para observación **Ocular**.
- **IAL_{CT}** Impacto Ambiental Lumínico en entorno **Cielo** para observación con **Telescopio**, que tiene mayor precisión que la ocular.

Es importante remarcar algunos aspectos muy importantes:

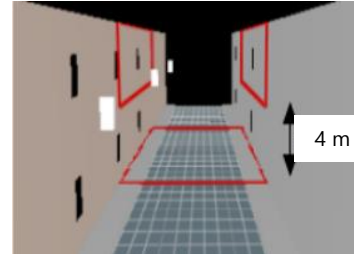
- La metodología y los umbrales propuestos se han basado en la bibliografía consultada y criterio del autor. Como ya se ha comentado, el estudio de esta problemática es todavía incompleto, y falta mucha información (por ejemplo en lo que hace referencia a repercusiones a seres vivos). Se ha extrapolado la información recogida a la globalidad del ecosistema nocturno.
- En un futuro, y el caso de conocerse la existencia de otros umbrales, pueden tenerse en cuenta y modificarse.
- La predicción de impacto ambiental siempre parte del estudio de una situación inicial. Si en ella, se encuentra que hay situaciones de inicio diferentes a las propuestas, deben modificarse en los procesos de cálculo o umbrales: Por ejemplo un observatorio astronómico amateur que no dispone de buena calidad de cielo, un entorno natural ya contaminado, etc. Estos son dos ejemplos de entornos ya degradados, que pueden dar a dos resultantes diferentes: O que el entorno ya está muy degradado y por lo tanto la instalación no va a impactar especialmente, o que alcanzar el umbral de impacto elevado es más fácil por proceder de una situación ya poco oscura o natural.

IAL_{H1} Impacto Ambiental Lumínico en entorno Humano Informativo
Método de cálculo de la afectación:
Datos necesarios:

- Disposición instalaciones
- Determinación del lugar de impacto (ventana, si existe). Si no, considerar cualquier superficie de fachada por encima de 4 metros

Metodología:

- Uso de programa de cálculo lumínico para determinación de nivel.


Resultados esperados:

- Nivel lumínico máximo en la superficie de estudio.

Umbral de repercusión en función de la sensibilidad del entorno:
 E_{H1} :

- No impacto si $E_{max} < 1 \text{ lx}$
- Impacto moderado si $E_{max} \geq 1 \text{ lx}$ y $E_{max} < 5 \text{ lx}$
- Impacto elevado si $E_{max} \geq 5 \text{ lx}$

 E_{H0} No hay evaluación

Referencias:

(Narisada and Schreuder 2004)

(GENCAT 2014)

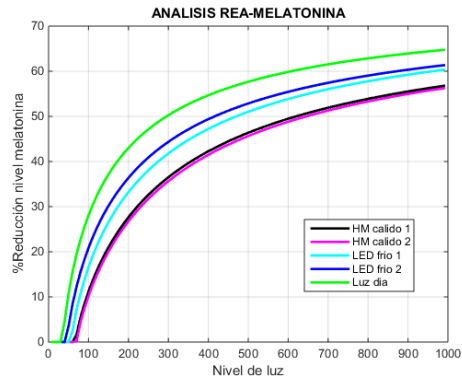
Método de cálculo de la afectación y repercusión:

Datos necesarios:

- Disposición instalaciones.
- Tipología de lámpara.
- Determinación del lugar de impacto (ventana, si existe). Si no se considera cualquier superficie de fachada por encima de 4 metros.

Metodología:

- Uso de programa de cálculo lumínico para determinación de nivel.
- Para determinar la repercusión se utiliza el modelo de Mark S. Rea (ver página siguiente):



Resultados esperados:

- Nivel lumínico máximo en la superficie de estudio.
- Reducción de melatonina potencial.

Umbral de repercusión en función de la sensibilidad del entorno:

E_{H1}:

- No impacto si %Reducción Melatonina < 10% .
- Impacto moderado si %Reducción Melatonina entre 10 % y 20%.
- Impacto elevado si %Reducción Melatonina > 20%.

E_{H0} No hay evaluación.

Referencias:

(Rea, Figueiro et al. 2005)

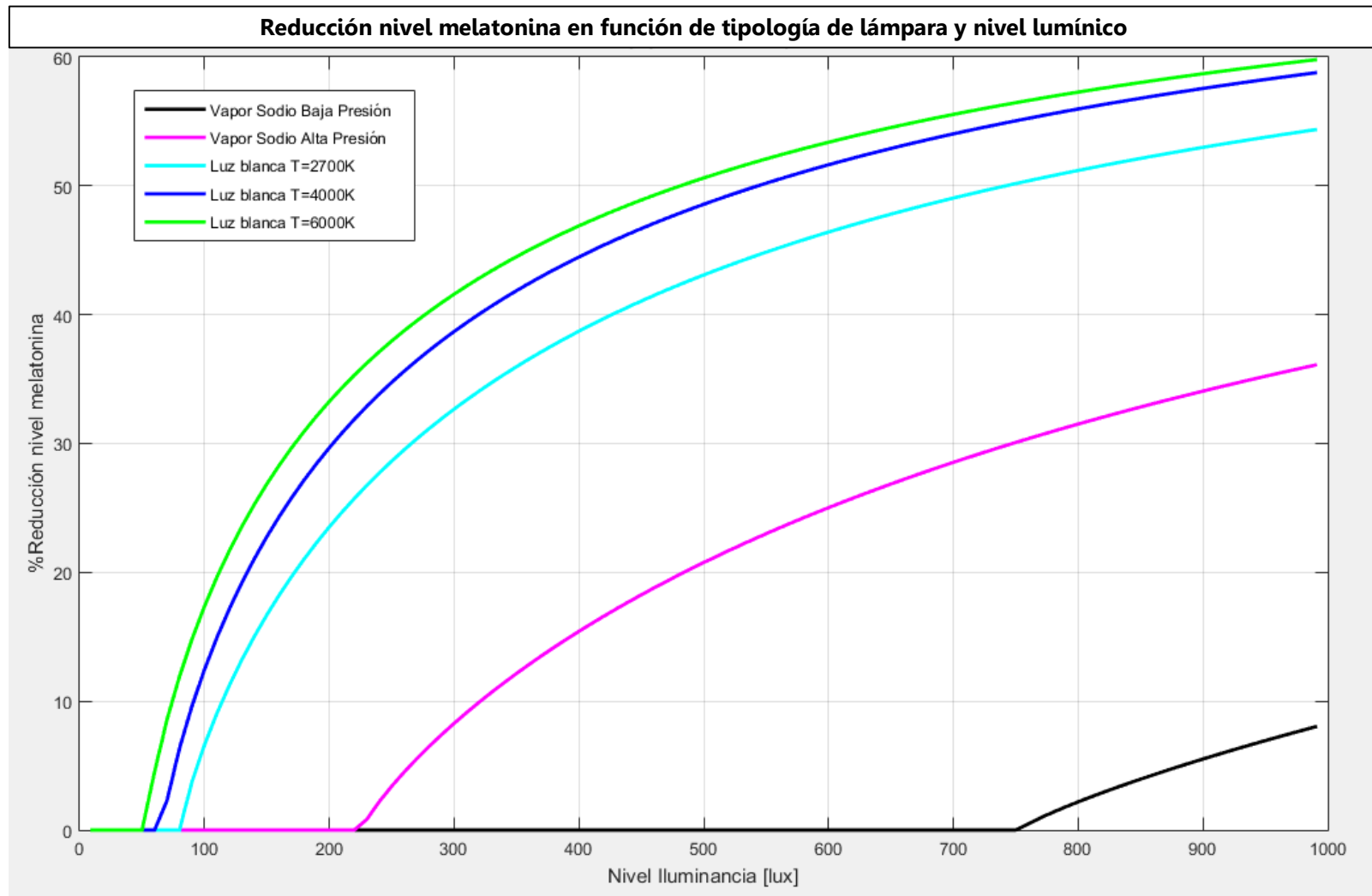


Figura 6.9 Reducción de nivel de melatonina en función de la tipología de fuente de luz y el nivel lumínico. Elaboración propia a partir de (Rea, Figueiro et al. 2005, Rea, Figueiro et al. 2007, Rea, Figueiro et al. 2010)



IAL_{EB} Impacto Ambiental Lumínico en entorno Ecosistema por puntos brillantes
Método de cálculo de la afectación y repercusión:
Datos necesarios:

- Disposición instalaciones.
- Ubicación de puntos brillantes a menos de 500 m.

Metodología:

- Uso de programa de cálculo lumínico para determinación de nivel.
- Medida luminancimétrica.


Resultados esperados:

- Nivel de luminancia máximo (L_{max})

Umbrales de repercusión en función de la sensibilidad del entorno:
E_{E1} y E_{E2}:

- No impacto si $L_{max} < 50 \text{ cd/m}_2$.
- Impacto moderado si L_{max} entre 50 cd/m_2 y 1000 cd/m_2 .
- Impacto elevado si $L_{max} > 1000 \text{ cd/m}_2$.

E_{E0} Y E_{E3} No hay evaluación.

Referencias:

(Narisada and Schreuder 2004)

(GENCAT 2014)

El máximo es por la mitad del brillo de la luna (bajo criterio del autor).

Método de cálculo de la afectación y repercusión:

Datos necesarios:

- Disposición instalaciones.
- Brillo de fondo de cielo.

Metodología:

- Uso de programa de cálculo lumínico para determinación de nivel. (E_{max1}).
- O medida luxométrica (E_{max}).
- Cálculo fondo de cielo con modelo Kocifaj.
- Cálculo factor de amplitación por nubes.
- Cálculo E_h con modelo Solano-Kocifaj. (E_{max2}).



Resultados esperados:

- Nivel de iluminancia máximo (E_{max}) como suma de las dos anteriores E_{max1} + E_{max2}.

Umbrales de repercusión en función de la sensibilidad del entorno:

Entrada en la tabla es nivel lumínico máximo de luz intrusa.

Impacto	E _{E1}	E _{E2}	E _{E3}
No presente	<0,01 lx ¹	<0,01 lx ¹	<1 lx
Moderado	Entre 0,01 y 0,03 lx	Entre 0,01 y 0,3 lx	Entre 1 y 5 lx
Elevado	>0,03 lx	> 0,3 lx	>5 lx

E_{E0} No hay evaluación.

Referencias:

- (Narisada and Schreuder 2004)
 (GENCAT 2014)
 (Kocifaj 2007)
 (Kocifaj and Solano 2014)
 (Kocifaj 2014)
 (Gaston, Davies et al. 2012, Gaston. 2013)

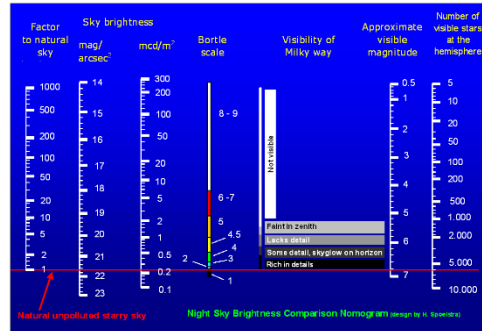
¹ Este valor está condicionado por la tecnología, y conocimiento en el proyecto luminotécnico, pero es claramente limitante y perjudicial para las especies nocturnas que más sensibles son a la presencia de luz artificial. La determinación de este valor debe estudiarse detenidamente en situaciones posteriores para poder evaluarlo en casos de especial sensibilidad.

IAL_{co} Impacto Ambiental Lumínico en entorno Cielo observación ocular

Método de cálculo de la afectación y repercusión:

Datos necesarios:

- Distancia del foco contaminante.
- UUF o EFS.
- Espectro de emisión de las lámparas.



Metodología:

- Cálculo fondo de cielo con modelo Kocifaj.
- Comparación con escalas comparativas.

Resultados esperados:

- Nivel de brillo de fondo de cielo y pérdida de capacidad de observación de estrellas. En mag·arcsec⁻².

Umbral de repercusión en función de la sensibilidad del entorno²:

Entrada en la tabla es nivel final de brillo de cielo en mag·arcsec⁻²

Impacto	E _{C1}	E _{C2}	E _{EC3}
No presente	<21,4	<21,2	<21
Moderado	Entre 21,4 y 20,5	Entre 21,2 y 20	Entre 21 y 19,5
Elevado	>20,5	>20	>19,5

E_{CO} No hay evaluación

Referencias:

- (Narisada and Schreuder 2004)
- (Kocifaj 2007)
- (Spoelstra 2013)
- (REECL 2015)

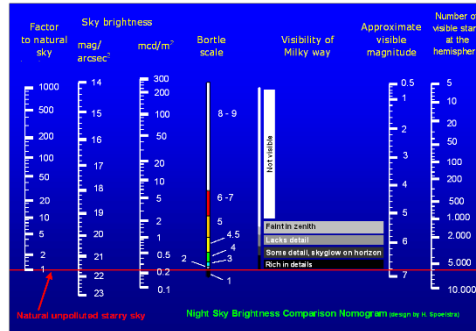
² Está fuera del alcance de esta investigación, la representación de estudios de observatorios de carácter científico de orden superior, en los que son necesarios estudios mucho más exhaustivos y adaptados a la casuística particular.

IALCT Impacto Ambiental Lumínico en entorno Cielo observación telescopio

Método de cálculo de la afectación y repercusión:

Datos necesarios:

- Distancia del foco contaminante.
- UUF o E.F.S.
- Espectro de emisión de las lámparas.



Metodología:

- Cálculo fondo de cielo con modelo Kocifaj.
- Comparación con escalas comparativas.

Resultados esperados:

- Nivel de brillo de fondo de cielo en el cénit y pérdida de capacidad de observación de estrellas. En mag-arcsec⁻².
- Posibilidad de predicción total All-Sky con modelo de Kocifaj.

Umbral de repercusión en función de la sensibilidad del entorno³:

Entrada en la tabla es nivel final de brillo de cielo en mag-arcsec⁻²

Impacto	E _{C1}	E _{C2}	E _{EC3}
No presente	<21,5	<21,5	<21,3
Moderado	Entre 21,5 y 21,4	Entre 21,5 y 21,2	Entre 21,3 y 20,5
Elevado	>21,4	>21,2	>20,5

E_{C0} No hay evaluación.

Referencias:

- (Narisada and Schreuder 2004)
- (Kocifaj 2007)
- (REECL 2015)

³ Está fuera del alcance de esta investigación, la representación de estudios de observatorios de carácter científico de orden superior, en los que son necesarios estudios mucho más exhaustivos y adaptados a la casuística particular.

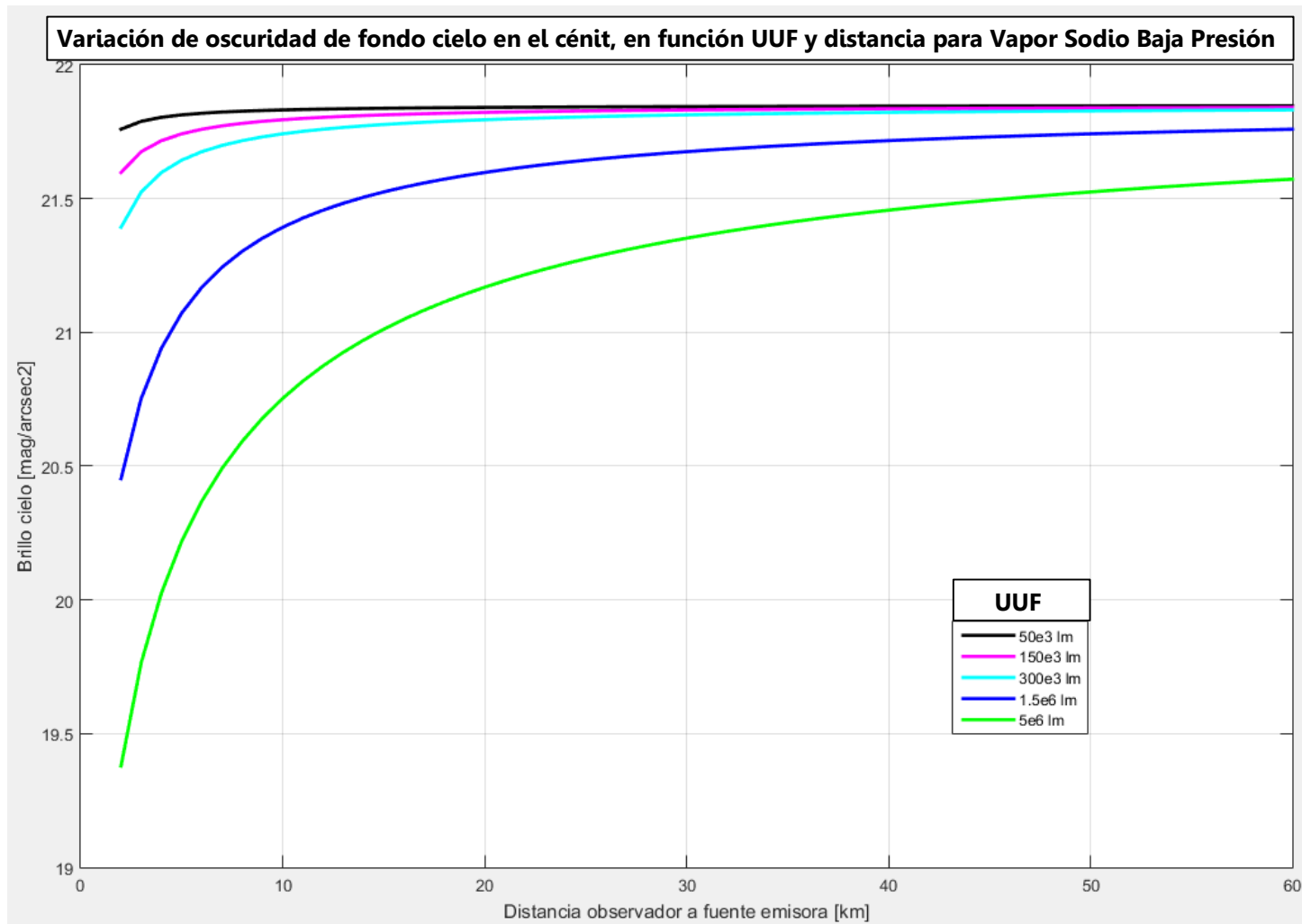


Figura 6.10 Reducción de oscuridad de fondo de cielo predicha, en función de la fuente contaminante, distancia del observador y para fuente de luz tipo Vapor Sodio a Baja Presión. Elaboración propia a partir del modelo (Kocifaj 2007, Tapia, Sanchez de Miguel et al. 2015).

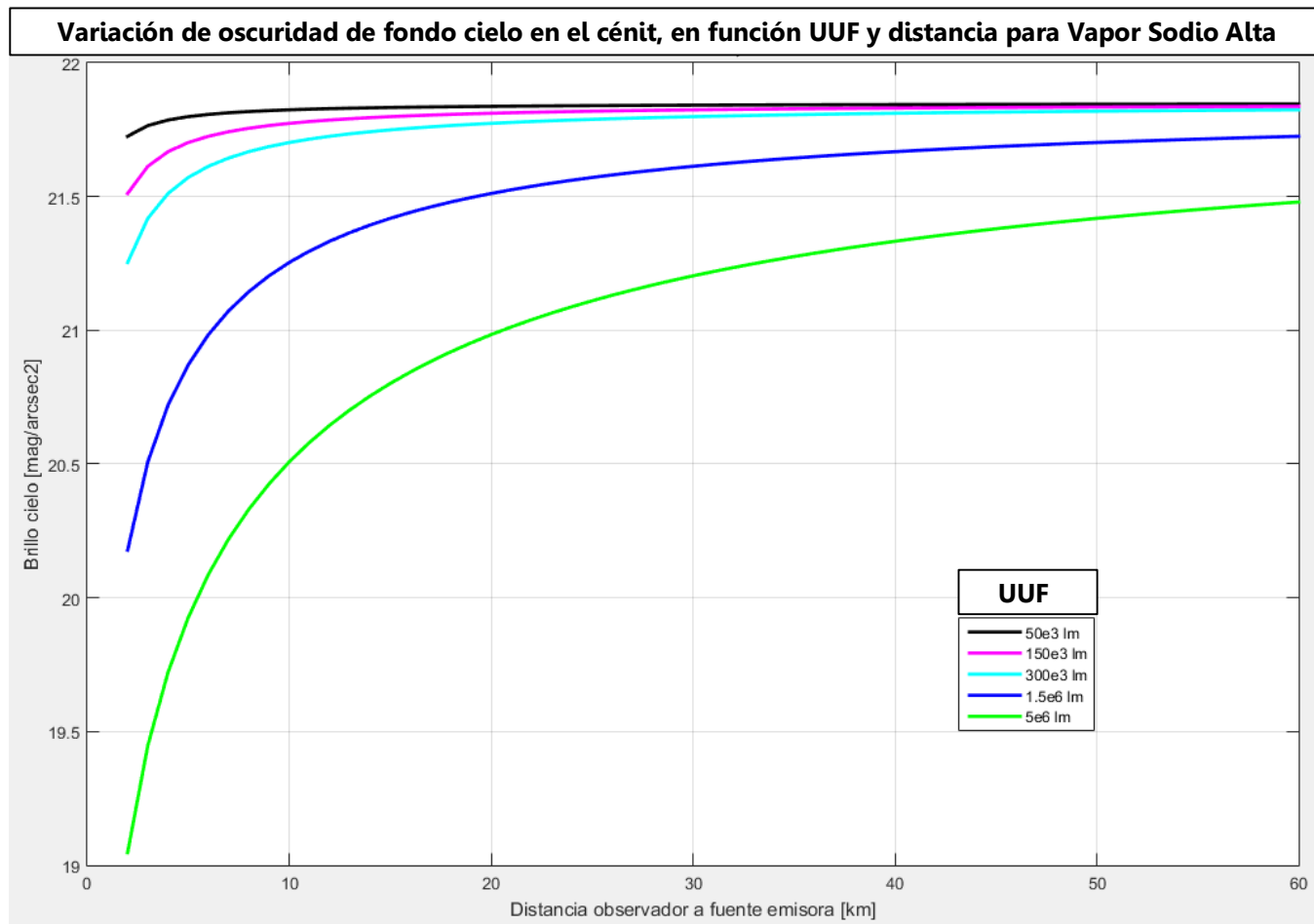


Figura 6.11 Reducción de oscuridad de fondo de cielo predicha, en función de la fuente contaminante, distancia del observador y para fuente de luz tipo Vapor Sodio a Alta Presión. Elaboración propia a partir del modelo (Kocifaj 2007). (Tapia, Sanchez de Miguel et al. 2015)

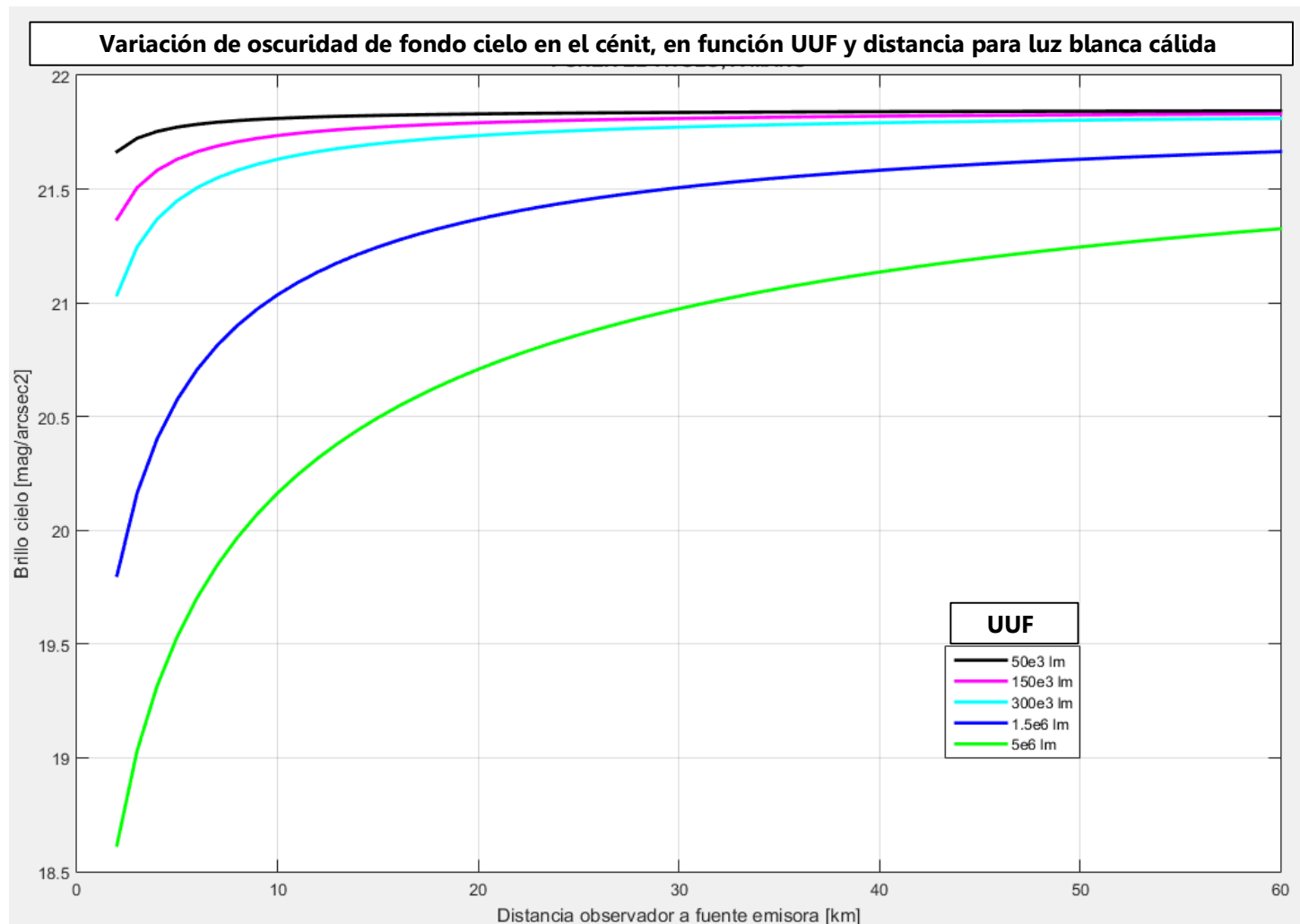


Figura 6.12 Reducción de oscuridad de fondo de cielo predicha, en función de la fuente contaminante, distancia del observador y para fuente de luz tipo luz blanca cálida ($T=3100K$). Elaboración propia a partir del modelo (Kocifaj 2007). (Tapia, Sanchez de Miguel et al. 2015)

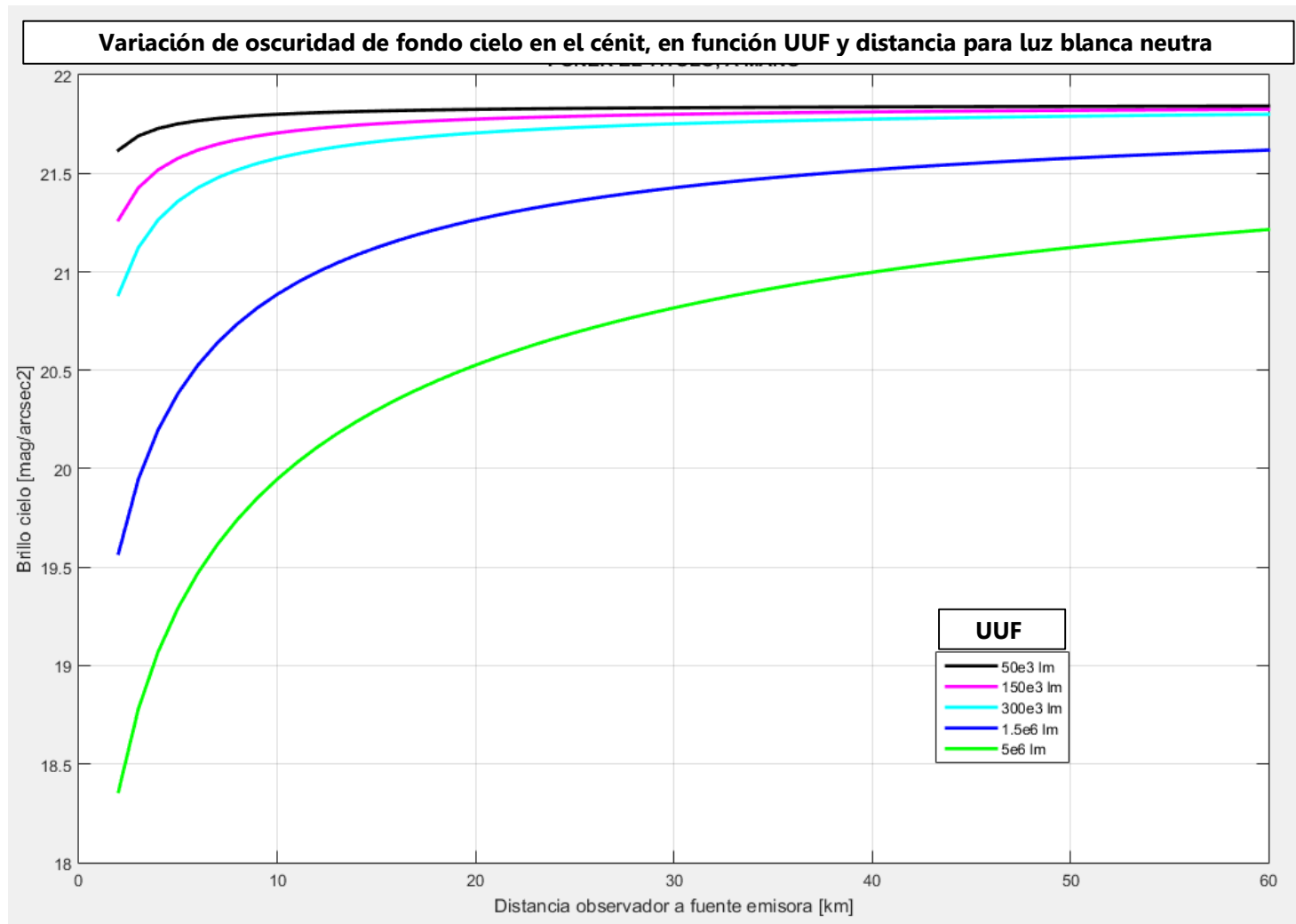


Figura 6.13 Reducción de oscuridad de fondo de cielo predicha, en función de la fuente contaminante, distancia del observador y para luz blanca neutra ($T=4200K$). Elaboración propia a partir del modelo (Kocifaj 2007). (Tapia, Sanchez de Miguel et al. 2015)

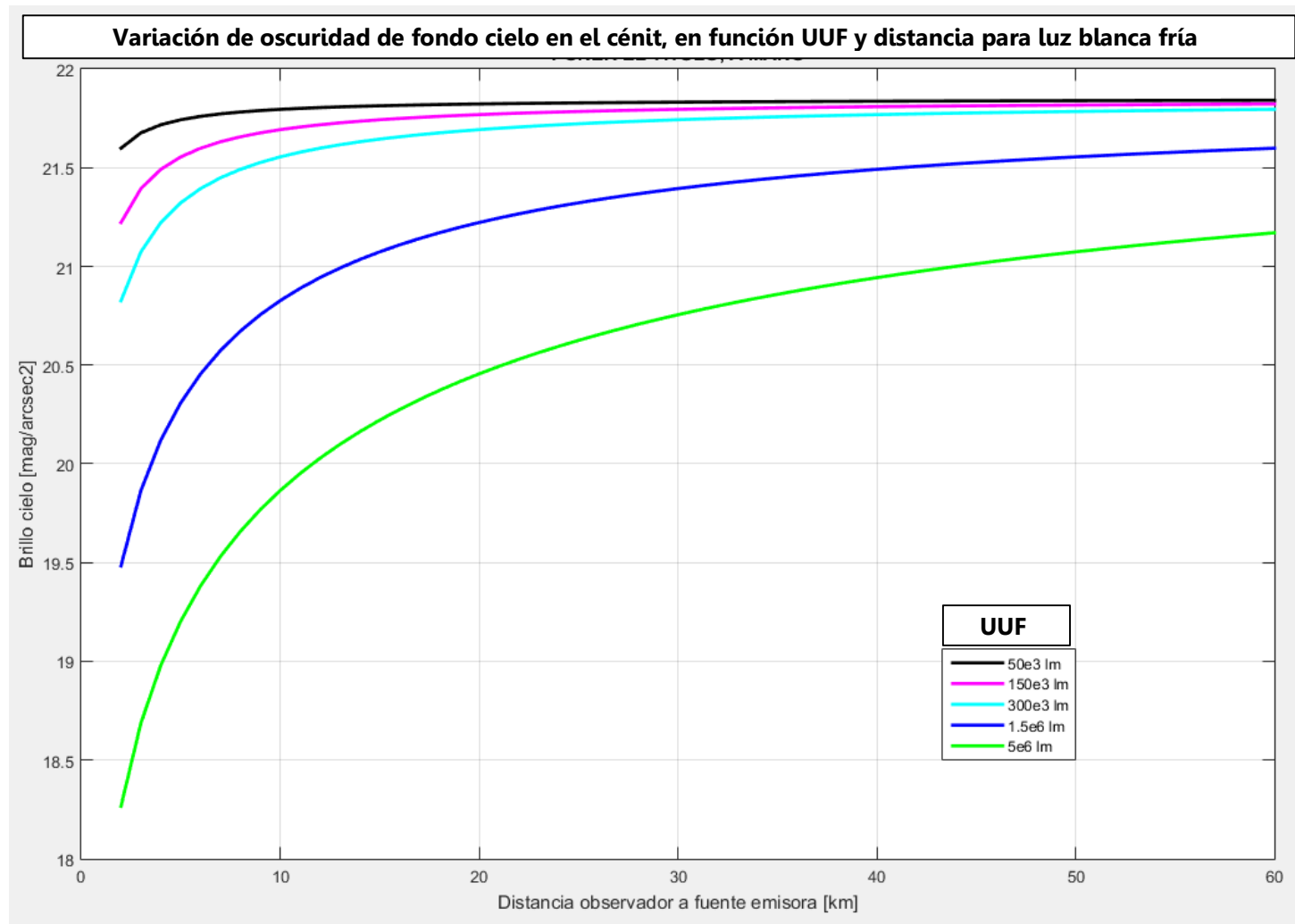


Figura 6.14 Reducción de oscuridad de fondo de cielo predicha, en función de la fuente contaminante, distancia del observador y para fuente de luz blanca fría ($T=5900K$). Elaboración propia a partir del modelo (Kocifaj 2007). (Tapia, Sanchez de Miguel et al. 2015)

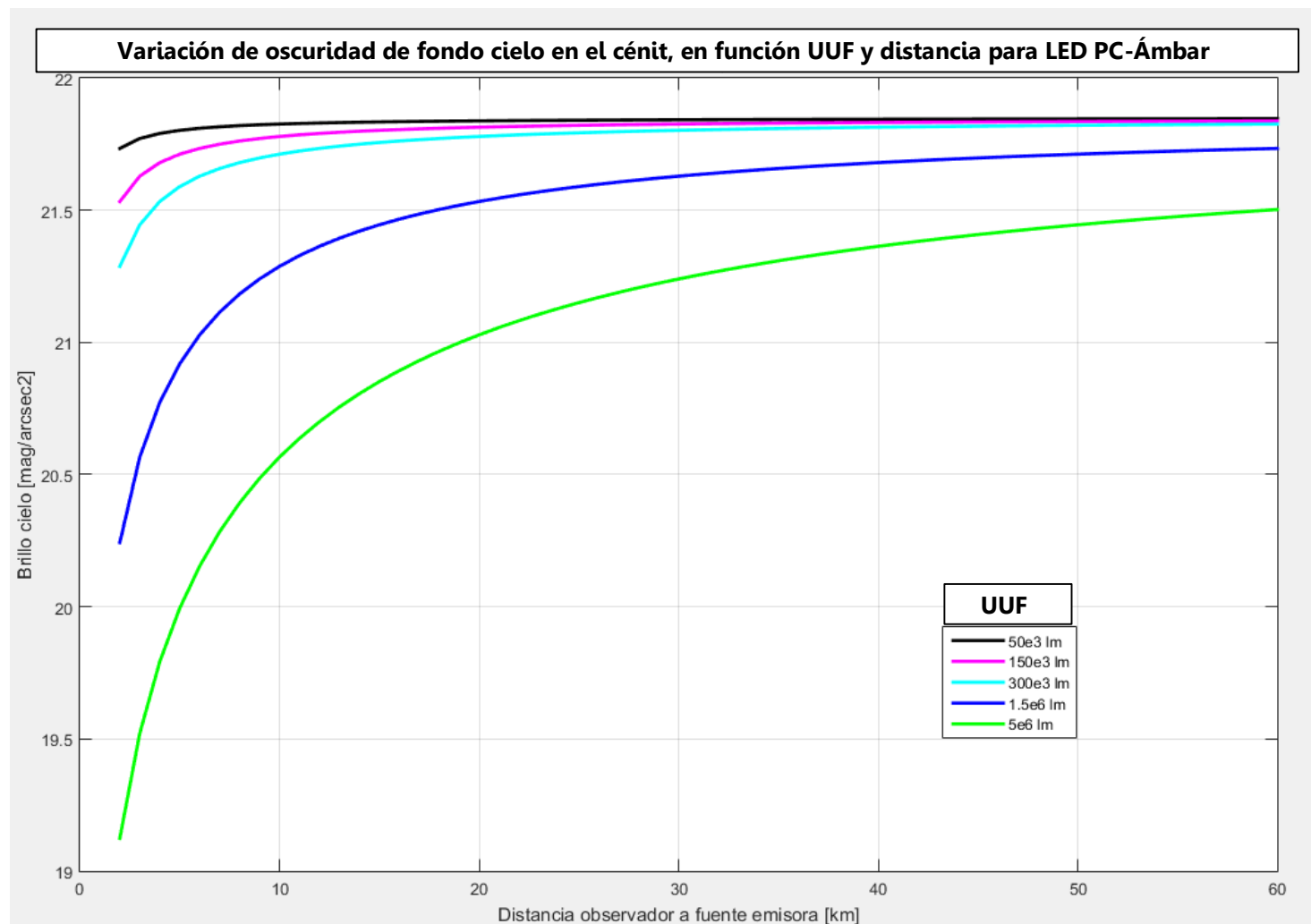


Figura 6.15 Reducción de oscuridad de fondo de cielo predicha, en función de la fuente contaminante, distancia del observador y para fuente de luz tipo LED PC-Ámbar. Elaboración propia a partir del modelo (Kocifaj 2007).

A partir de un trabajo extenso, ya especializado del modelo de M.Kocifaj, se puede extraer información detallada, de la variación de la cúpula celeste:

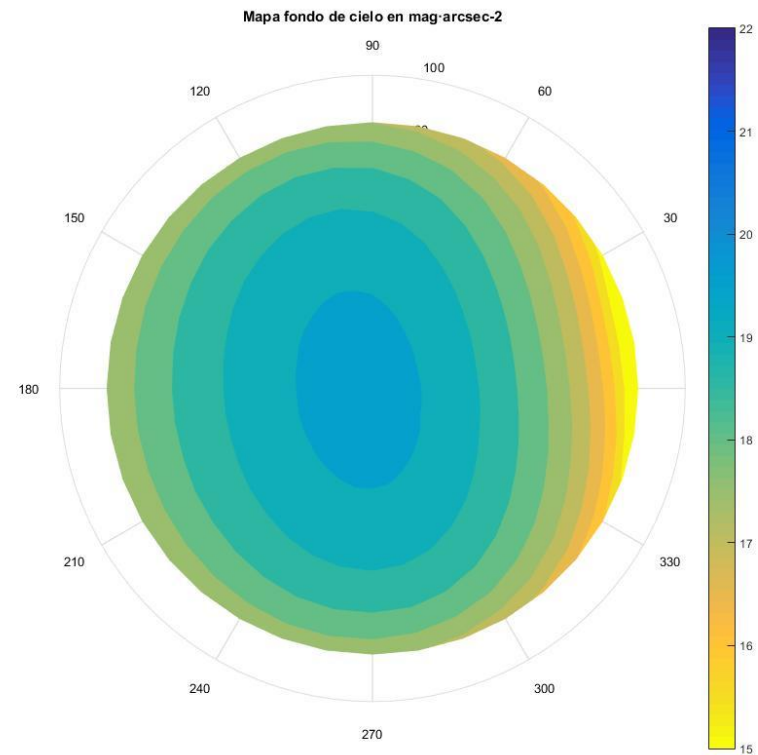


Figura 6.16 Mapa de fondo de cielo ejemplo 1. Elaboración propia a partir del modelo (Kocifaj 2007).

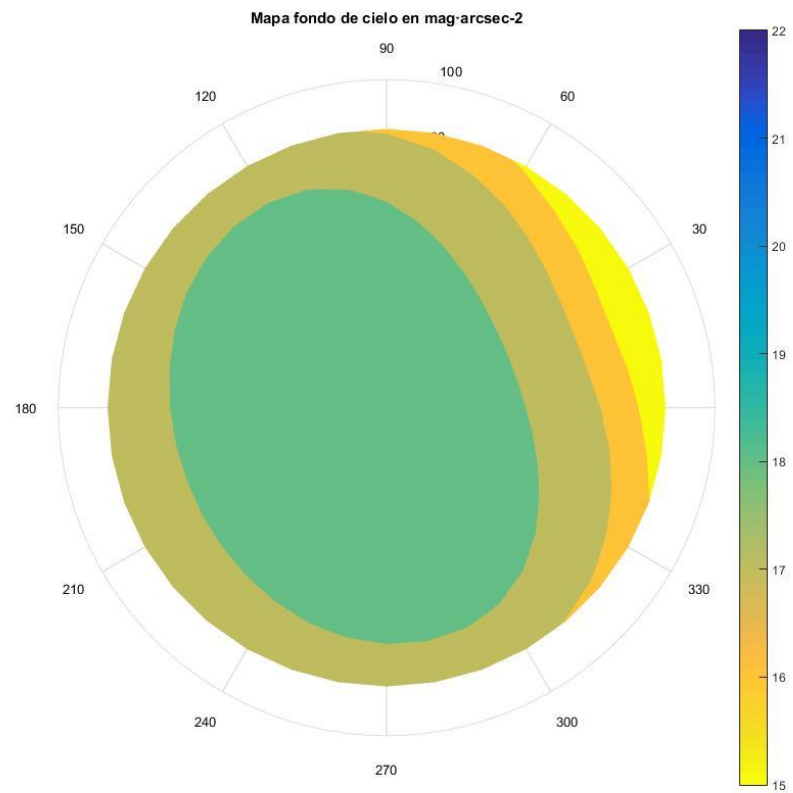


Figura 6.17 Mapa de fondo de cielo ejemplo 1. Elaboración propia a partir del modelo (Kocifaj 2007).

7. CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE TRABAJOS DE FUTURO.

Pero aunque el mundo desdeña a los balleneros, sin embargo, y sin tener conciencia de ello, nos rinden el más encendido homenaje. Pues casi todos los cirios, lámparas y bujías que arden en los confines del globo lo hacen, para gloria nuestra, con aceite de ballena.

(Moby Dick)

Herman Melville



7. CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE TRABAJOS FUTUROS

La comprobación y desarrollo investigador para demostrar la hipótesis, ha originado una serie de conclusiones en diferentes fases del trabajo. Expuestas en diferentes bloques son:

A modo de conclusión sobre el proceso investigador:

Se ha establecido un proceso mediante el que se han analizado las fuentes de información necesarias para poder cuantificar las repercusiones de la contaminación lumínica. En éstas se ha podido analizar el estado actual de la ciencia, la modelización para predecir efectos, y la posibilidad de implementarla en proyectos de alumbrado. Allí donde no existía conocimiento, se ha desarrollado (sobre todo en la cuantificación de la fuente contaminante).

Posteriormente se han procedido a evaluar las diferentes formas de medida, y se determinado su validez para poder utilizarlos de forma fácil y por personal técnico, no científico. Este instrumental de medida puede determinar el estado inicial y final de un entorno, cuando se implanta un proyecto luminotécnico.

Con todo ello, se ha ideado una metodología según el conocimiento existente, desarrollado y adecuadamente organizado, para que pueda implantarse de forma fácil en proyectos, allí donde sea necesario.

Así pues, la hipótesis de partida,

Es posible implementar una metodología para la predicción del impacto ambiental de la radiación lumínica proveniente de las fuentes de alumbrado nocturno, y que sirva de herramienta para minimizar sus repercusiones en la redacción de proyectos de ingeniería.

se considera demostrada.

A modo de aportaciones en los diferentes estados del proyecto:

En lo que hace referencia al análisis de las instalaciones de alumbrado, a su dimensión y a sus características contaminantes, se ha observado:

- Existía un vacío para poder dimensionar correctamente la magnitud contaminante, en unidades luminotécnicas (lúmenes). El método RAMA-L está ideado para instalaciones

singulares, y su extrapolación a nivel de una población entera, es costoso. Este vacío lo ha corregido el método para la determinación del UUF, como magnitud total contaminante en lúmenes.

- El resto de características luminotécnicas, pueden desarrollarse mediante métodos tradicionales de cálculo o de descripción luminotécnico (como el espectro o cálculo lumínico).
- Existen ciertas similitudes en diferentes tipologías de fuentes de luz, de forma que pueden utilizarse "espectros de emisión tipo" para su evaluación ambiental. Por ejemplo uniendo por tipología de lámparas, cuyos espectros de emisión pueden ser conocidos. A partir de esta información se puede simplificar el proceso de cálculo posterior.

En lo que hace referencia al estado actual de las repercusiones y su cuantificación:

- Existe un amplio conocimiento de las repercusiones sobre la cúpula celeste. Se crearon modelos predictivos desde los años 70, pero a pesar de ello, son de compleja utilización, de forma ordinaria.
- Desde el descubrimiento de las células ipRGCs en la retina humana, ha abierto nuevas puertas de investigación de la problemática sobre el ser humano. Se han publicado diversos modelos predictivos, también de difícil implementación de forma directa.
- El conocimiento de las repercusiones de la contaminación lumínica en los ecosistemas, es todavía bastante superficial. Se centra en algunas especies, y no existen comportamientos estandarizados para poblaciones complejas, ni modelos de predicción de las repercusiones de la problemática.
- Existe un efecto hasta hace poco no muy conocido: El del efecto de fuente de luz del resplandor luminoso sobre los ecosistemas más necesitados de oscuridad. Este efecto denominado afectación indirecta a ecosistemas, ha sido calculado mediante los modelos teóricos, y también verificado experimentalmente. Es necesario incluirlo en la predicción por su importancia para las especies más sensibles, el efecto multiplicador de las nubes, y su importante extensión (fácilmente decenas de km de las grandes ciudades). Este efecto multiplicador ha sido calculado teóricamente en más de 8, medido en bibliografía con valores superiores a 17 y experimentalmente superiores a 9.

En lo que hace referencia al instrumental de medida utilizado:

- Todas las medidas de fondo de cielo se han y deben realizarse en condiciones buenas de observación. Esto es: sin nubes en la cúpula celeste y sin la presencia de la Luna en ningún momento. Esto origina una limitación temporal en la planificación de proyectos, por las pocas "ventanas" temporales para realizar el trabajo de campo.

- Las cámaras All-Sky son un instrumento muy importante para la determinación del brillo del cielo de toda la cúpula. Su uso debe realizarse por personal especialista.
- El Sky Quality Meter es una buena opción para la determinación simple del brillo y con extensión geográfica o temporal. Para detectar comportamientos diversos en estas dos dimensiones. A pesar de ello, sólo puede realizar medidas en un filtro y con una sensibilidad cercana a la del visible, pero no exactamente ella. Es un aparato muy extendido y su uso sencillo. A pesar de ello, su utilización para determinar el brillo de toda la cúpula celeste con suficiente precisión no es viable, y se requiere el complemento de las cámaras AllSky para determinar toda la información.
- La captación de imágenes por satélite, mediante el sensor VIIRS por ejemplo, son una opción viable, y deben ser realizadas por personal experto. Su precisión y viabilidad han sido demostradas en Deltebre.
- Para las mediciones de las afectaciones en ecosistemas, son necesarios Luxómetros clase A (clase B no es suficiente) y un luminancímetro de clase B.
- Para las mediciones de las afectaciones en viviendas, se pueden realizar mediante luxómetros clase B, o mediante una aproximación inicial, con tratamiento digital de imagen donde el acceso sea difícil. A pesar de ello, este último método tiene muy baja precisión con cámaras digitales de mercado, debido a la una importante cantidad de interferencias experimentales. Debe tratarse como un método preliminar de aproximación a los casos problemáticos.

En lo que hace referencia al estado actual de la problemática a nivel de proyecto luminotécnico:

- Existe una dificultad a la hora de determinar el impacto ambiental de instalaciones de alumbrado. Incluso muchas veces la reglamentación no hace referencia a ellas de forma concreta y limita su necesidad de estudio.
- El cumplimiento estricto de la normativa no es suficiente para la protección del medio, por lo que es necesario implementar el conocimiento de las repercusiones como herramienta de decisión en el proyecto de alumbrado.
- La complejidad de los métodos de predicción conocidos hace muy difícil poder implantarlos en proyectos de alumbrado, de forma que ha sido necesario la generación de herramientas de fácil consulta.

A modo de aportaciones con carácter original:

Extrayendo de lo comentado anteriormente, se enumeran a continuación las aportaciones más significativas consideradas con carácter original:

-
- El dimensionamiento de la fuente contaminante: Tanto a nivel de instalación (con el E.F.S.) como de zona extensa (con el U.U.F.) y su corroboración experimental en diferentes lugares (Deltebre, Masnou, etc.).
 - Comprobación experimental de la afectación intrusa indirecta en ecosistemas, provenientes de la iluminación de la cúpula celeste. Dando como resultados valores equiparables al modelo de Kocifaj y Solano.
 - Uso de cámaras digitales de mercado como método aproximado para verificar la luz intrusa en viviendas.
 - La determinación mediante simulación, del grado de luz intrusa en viviendas, en función de una serie de variaciones urbanísticas y de instalaciones. Los valores obtenidos pueden superar en varias ocasiones los 200 lx incluso por encima de los 4 metros de altura de fachada. Estos valores pueden ser suficientes para generar una importante reducción de melatonina en el cuerpo humano.
 - Elaboración del procedimiento para realizar mapas de fondo de cielo a partir de las medidas tomadas mediante el SQM en vehículo y teniendo en cuenta las superficies urbanizadas y su tratamiento mediante S.I.G.
 - Creación de herramientas gráficas de fácil consulta por personal técnico para: Determinar preliminarmente el alcance del impacto ambiental, y posteriormente el impacto propiamente.
Las entradas para realizar las consultas son parámetros luminotécnicos, comúnmente utilizados: flujo lumínico, tipología de lámpara, potencia nominal, distancia entre punto de observación y de emisión, etc. Se han desarrollado para los modelos de Kocifaj 2007 y M.S. Rea 2005 y programados en MATLAB®.
 - La organización de todas estas herramientas y métodos en un método de análisis global.

La mayoría de estas aportaciones han sido consultadas a expertos y corroboradas mediante publicaciones en revistas y congresos. Las más importantes pueden verse enumeradas en el Anexo A.

A modo de conclusiones finales

El presente desarrollo pretende ser un fino hilo entre diversas ciencias y profesiones: Astronomía, Biología, Medicina, Ingeniería... Un análisis que, lejos de ser sencillo, tiene muchos prismas de interpretación. Cada uno con una cultura científica y profesional, opiniones formadas y sensibilidades muy marcadas; a menudo inamovibles.

El procedimiento desarrollado se articula como una forma amplia de entender la problemática, y poder aplicarlo en función del conocimiento de la ciencia de cada momento. El uso de herramientas gráficas debe ser de gran ayuda para su consulta. Sobre todo las gráficas de predicción del impacto, de muy rápida consulta, han de permitir determinar si grandes reformas de instalaciones de alumbrado tienen alteración en el entorno o no.

El coste de la predicción del impacto ambiental lumínico en los proyectos de alumbrado tradicionales es elevado, por lo que su implantación va dirigida a reformas importantes, Planes Directores o a instalaciones en zonas de especial sensibilidad.

A pesar de ello, y como toda herramienta final, deben conocerse sus ventajas y peligros. Algunos aspectos que hay que remarcar son:

- El uso del umbral de 0,01 lx de afectación a ecosistemas es valor limitante debido al instrumental de medida y simulación lumínica. Si estos cambian, puede variarse el umbral para proteger los ecosistemas más sensibles.
- El análisis de observatorios astronómicos más importantes, no pueden desarrollarse mediante esta metodología. Debe adecuarse a cada lugar concreto, mediante todos los factores atmosféricos (atenuación, turbulencia, etc.) y de longitudes de onda de la radiación a observar.
- A la hora de realizar los análisis de impacto, debe considerarse la componente temporal diaria, puesto que el uso de sistemas de reducción de flujo lumínico de las instalaciones son cada vez más usados.
- La valoración del impacto ambiental como: inexistente, moderado o elevado debe ser contrastado en lugares donde el estado de la ciencia todavía no ha dado valores definitivos. El caso de las repercusiones fisiológicas en el ser humano es el ejemplo más claro.
- El conocimiento de las instalaciones de alumbrado es crucial. Las nuevas fuentes de luz, las tipo LED, suelen tener un espectro de emisión más contaminante que las existentes actualmente (principalmente VSAP). A pesar de ello, la elección de una fotometría, espectro lumínico y potencia adecuada puede representar una disminución del impacto ambiental. Es por eso, que la herramienta debe ser utilizada por personal luminotécnico adecuado, igual que el instrumental de medida más preciso debe ser operado por personal técnico experimentado.

Propuestas de continuación para trabajos futuros:

Todo trabajo de investigación genera conocimiento por parte del investigador en un campo, y multitud de campos abiertos para continuar y seguir desarrollando la ciencia. Este trabajo no ha sido una excepción. Existe una gran diversidad de campos para desarrollar futuras investigaciones, por ejemplo:

- Como cuantificar y modelizar la visión de diversos animales y en diferentes ecosistemas: sensibilidad visual de los animales (no solo de unos pocos), la interferencia informativa de la luz en sus procesos vitales, la aportación o minimización de la problemática general, etc.
- Modelizar el comportamiento de animales a puntos de alta luminancia.
- Conocimiento de la fotometría del UUF (función de emisión), como forma de perfeccionar la aplicación de los modelos de dispersión atmosférica.
- Determinación de la luz intrusa en la zona de descanso de las viviendas, no en las ventanas. Para determinar con más exactitud la irradiación necesaria para aplicar el método de M. S. Rea.
- Factor AF de amplificación de las nubes debido a nubes en lugares con oscuridad de cielo muy elevada. En estos casos el AF se ha detectado experimentalmente < 1 , y no está bien reconocido por los modelos de M. Kocifaj y H. Solano.
- Determinación de una alternativa al número de Garstang (o de Walker), para cuantificar de forma rápida y sencilla la magnitud contaminante de zonas pobladas.
- Estudiar la implantación de los métodos de predicción (como este), en la normativa actual vigente. Sus repercusiones, ventajas e inconvenientes.

AGRADECIMIENTOS.

El trabajo que en este documento se presenta, es el fruto de muchos años de trabajo profesional, de dedicación investigadora, de peligrosa curiosidad de carácter adictivo y discusiones eternas con mi primer tutor. Estos años comenzaron antes incluso de acabar la carrera de Ingeniería Industrial, cuando empecé a desarrollar mi Proyecto de Final de Carrera, ya con clara orientación investigadora. Es por eso, que 15 años después (y con el temor a dejarme a alguien), quiero agradecer incondicionalmente toda la colaboración, ánimos y ayuda a un buen grupo de compañeros y sobre todo amigos.

A mi director Dr. Carlos Sierra por aconsejarme sabiamente y achucharme sin perdón para llegar a la línea de meta con solvencia.

A los evaluadores y a los miembros del tribunal por su dedicación, profesionalidad y sabios consejos.

Gracias a todos mis compañeros de departamento. A los que están ahí y a los que no están ya: Águeda García, Víctor Albert, María Margarita González, Lourdes Durany, Xavier Carod, M. Teresa Delgado, Lázaro Cremades y Antoni Creus.

A mis amigos A. Mañas, D. Buendía, C. Lora, T. Núñez, J.D. Fernández, E. Peras, L. Prieto, M. Salvatierra, A. Riego, C. Solé, J. M. Rodríguez, S. Nohara, Marcos, A. Jimenez, J.A. Esteban, D. Folch, O. López y en general a todos aquellos compañeros de clase, viajes a Alcañiz, pantallas de fósforo verde y posteriores allegados.

A mis compañeros de trabajo: A. Calero, J. Calero, P. López, P. Palau, A. Sánchez, X. Figueres, M. Lázaro Talegón, A. Norimaki, T. Carrasco, G. González, S. Antón, E. Sanahuja, I. Claramunt, P. Francia, X. Carod, M. Atencia. Sobre todo a los de la última etapa, en la más intensamente hemos trabajado: Ramón Estrada, Conchi Gómez, Èlia Casas, y Miguel Ángel Fidalgo.

Gracias a todos los profesionales, ahora también amigos del sector que me han ayudado de mil formas posibles: Ángela Ranea, Estefanía Cañavate (Junta de Andalucía), Susana Malón (Lumínica Ambiental), Salvador Roure (Salvi), Marc Montlleó y Itzel Sanromà (Barcelona Regional), Jordi Adrogué (Ajuntament de Santa Coloma de Gramenet), Pere Catalán (Ajuntament de Pineda de Mar), Alfons Fors (Ajuntament de Deltebre), Xavier Catalán y Joan Muñoz (Elecnor), Joan San Martín (Enllumenats Costa Brava), Ramón San Martín Jr. (Escofet), Manel Roig (Miatec), Manel Casas (COEIC), Blanca Martínez de Foix, Lluís Ferrero y Diego Zamora (Diputació de Barcelona), Silvia Mas (Ajuntament de Sant Feliu de Guíxols), Lluís Gustems, Anna Calmell y Sergi Aparicio (Generalitat de Catalunya).

A mis compañeros del primer intento de hacer este proyecto: Álvaro Jiménez, Héctor Solano, Patricia Elke y Marta Culubret.

A mis acompañantes en el viaje de la investigación. Con una actividad y dedicación desinteresada y siempre en busca de la curiosidad y el conocimiento común: Salvador X. Barà (USC), Jaime Zamorano, Alejandro Sanchez de Miguel y Carlos Tapia (UCM), Salvador J. Ribas (Observatori del Montsec), Carlos Herranz y Pere Horts (Celfosc), Javier Díaz Castro y a Federico de la Paz (del IAC) y su amabilísima compañía en el Roque de los Muchachos; y en general a todos los integrantes de la Red Española de Estudios de Contaminación Lumínica.

A mis padres y sus valores, esas magnitudes que no se pueden cuantificar, y sin los que hubiera sido imposible desarrollar desde el inicio toda esta carrera académica.

A mis hermanos Joan y Sergio, y también a Tomás y Juanda. Y a esas eternas jornadas en bicicleta atravesando territorios y sufriendo inclemencias; jornadas que construyen un carácter duro y siempre con el objetivo planteado en la meta y en el camino, y no en lo que queda.

A Laia, Pau y Nil, que durante todos estos años hemos crecido juntos y me han aguantado incondicionalmente, pese a todos esos ratos de mal genio.

Y sobre todo a Ramón San Martín Páramo, a quien debía algo, y con quien ya no podré discutir sobre el fondo de las cosas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. Introducción

- Bará, S. (2013). "Light pollution and solid-state lighting: reducing the carbon dioxide footprint is not enough." *SPIE Proceedings* **8785**(1).
- Carolyn, B. (2015). "Steam powered electric arc light being used for harvesting at night. From 1882 French book on electric lighting." Retrieved 02-feb-2015, from <https://twitter.com/kylenano/status/560868633241747458>.
- Celfosc.org. (2001). Retrieved 04-feb-2015, from <http://www.celfosc.org>.
- DARKSKY (2014). El nobel de física 2014 premia las investigaciones sobre los diodos emisores de luz azul: 3.
- ELPAIS. (2014). "Nobel de física para los LED de las bombillas de bajo consumo." Retrieved 7-oct-2014, 2014, from http://elpais.com/elpais/2014/10/07/ciencia/1412676307_341462.html.
- Falchi, F. e. a. (2011). "Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility,." *Journal of Environmental Management*.
- García Gil, M. (2012). Método de evaluación del impacto ambiental lumínico para instalaciones de alumbrado exterior. XXXVIII Simposium Nacional de Alumbrado, Toledo.
- García Gil, M., R. San Martín Paramo and H. S. Solano Lamphar (2012). Contaminación lumínica. Una visión desde el foco contaminante: El alumbrado artificial. Barcelona, Iniciativa Digital Politécnica.
- García, O. (2010). "Smoky Barcelona." Retrieved 02-feb-2015, from https://www.flickr.com/photos/o2_photo/5319475397/.
- GENCAT. (2014). "Projecte de Decret de desenvolupament de la Llei 6/2001." Retrieved 10-oct-2014, 2014, from http://mediambient.gencat.cat/web/.content/home/ambits_dactuacio/atmosfera/contaminacio_luminosa/doc/projecte_de_decret.pdf.
- GENCAT. (2015). "Contaminació al vector atmósfera." Retrieved 26-jan-2015, 2015, from http://mediambient.gencat.cat/es/05_ambits_dactuacio/atmosfera/.
- Gengnagel, T., P. Wollburg and E. Mills (2013). Alternatives to Fuel-based Lighting for Night Fishing. THE LUMINA PROJECT. University of Bayreuth, Germany
- Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, USA, U.S. Department of Energy.
- Gómez Orea, D. (2003). Evaluación de impacto ambiental: un instrumento preventivo para la gestión ambiental.
- Grandstein, F., O. James and A. Smith (2004). A Geologic Time Scale, The press syndicate of the University of Cambridge.
- Halliday, A. N. (2001). "Earth science: In the beginning." *Nature* **409**(6817): 144-145.
- Hoffman, P. F., A. J. Kaufman, G. P. Halverson and D. P. Schrag (1998). "A Neoproterozoic Snowball Earth." *Science* **281**(5381): 1342-1346.
- Iñigo Fernández, L. E. (2012). Breve historia de la Revolución Industrial.
- JUNTA-Andalucía. (2015). "Vector atmósfera."
- Kalipedia. (2012). "Iluminación de una fábrica." Retrieved 02-nov-2012, 2012, from <http://www.kalipedia.com>.
- Kolbert, E. (2015). La sexta extinción. Una historia nada natural.

Maseres, L. (2009). "Valencia, capital europea de contaminación lumínica." Retrieved 23-3-2015, from http://elpais.com/diario/2009/05/10/cvalenciana/1241983078_850215.html.

Narisada, K. and D. Schreuder (2004). Light pollution handbook, Springer.

Nixon, D. (2015). "Light pollution Simulator." Retrieved 25-jan-2015, from <http://www.need-less.org.uk/>.

San Martín Páramo, R. (2007). The Noise of light. StarLight A Common Heritage, La Palma (Canary Island), Starlight Initiative

Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC).

San Martín Páramo, R. (2011). "La dimensión tiempo en la iluminación." Retrieved 26-jan-2015, 2015, from www.youtube.com/watch?v=09kGON-YUjg

Sánchez de Miguel, A., J. Zamorano, J. Gómez Castaño and S. Pascual (2014). "Evolution of the energy consumed by street lighting in Spain estimated with DMSP-OLS data." Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer **139**(0): 109-117.

Sky, I. G. o. E. f. t. P. o. t. N. (2014). Declaración sobre el uso de la luz blanca rica en componente azul para el alumbrado nocturno. JUNTA-Andalucía: 7.

Trueba, D. (2015). Els llums del meu carrer. EL PERIODICO.

UNESCO. (2015). "2015 International Year of Light." Retrieved 26-jan-2015, 2015, from <http://www.light2015.org/Home.html>.

Walker, C. E. (2015). "Light Pollution Awareness through Globe at Night & IYL2015." American Astronomical Society Meeting Abstracts **225**: 225-243.

Wikipedia. (2015). "Wikipedia. The Free Encyclopedia." Retrieved jan-2015, 2015, from <http://www.wikipedia.org>.

2. Estado del arte

Angel, A. e. a. (2014). "Ecological risk assessment of sea turtles to tuna fishing in the ICCAT Region." ICCAT **70**(5).

Bates, A. e. a. (2014). "Garden and landscape-scale correlates of moths of differing conservation status : significant effects of urbanization and habitat diversity." PLoS ONE **9**(1): 11.

Beniè J., Davies T.W., J. P. Duffy, Inger R. and K. J. Gaston (2014). "Contrasting trends in light pollution across Europe based on satellite observed night time lights." Nature Scientific Reports **4**(3789).

Berry, M., D. T. Booth and C. J. Limpus (2013). "Artificial lighting and disrupted sea-finding behaviour in hatchling loggerhead turtles (*Caretta caretta*) on the Woongarra coast, south-east Queensland, Australia." Australian Journal of Zoology **61**(2): 137-145.

Berson, D. M. (2003). "Strange vision: ganglion cells as circadian photoreceptors." TRENDS in Neurosciences **26**(6): 7.

Bidwell, T., P. Goering, B. Dickinson and R. French (2007). Scotobiology. The biology of Darkness. The Science of Dark-Dependent Biological Systems. StarLight A Common Heritage, La Palma (Canary Island), Starlight Initiative

Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC).

Bierman, A., T. R. Kkein and Rea M. S. (2005). "The Daysimeter: a device for measuring optical radiation as a stimulus for the human circadian system." Measurement Science and Technology **16**: 2292-2999.

Bird, S., Parker J. (2014). "Low levels of light pollution may block the ability of male glow-worms (*Lampyrus noctiluca* L.) to locate females." Journal of Insect Conservation **18**(4): 7.

- Blask, D. E., G. C. Brainard, R. T. Dauchy, J. P. Hanifin, L. K. Davidson, J. A. Krause, L. A. Sauer, M. A. Rivera-Bermudez, M. L. Dubocovich, S. A. Jasser, D. T. Lynch, M. D. Rollag and F. Zalatan (2005). "Melatonin-depleted blood from premenopausal women exposed to light at night stimulates growth of human breast cancer xenografts in nude rats." *Cancer Res* **65**(23): 11174-11184.
- Bonmati-Carrion, M., R. Arguelles-Prieto, M. Martinez-Madrid, R. Reiter, R. Hardeland, M. Rol and J. Madrid (2014). "Protecting the Melatonin Rhythm through Circadian Healthy Light Exposure." *International Journal of Molecular Sciences* **15**(12): 23448-23500.
- Boscarino, B. T., L. G. Rudstam, J. L. Eillenberger and R. Gorman (2009). "Importance of light, temperature, zooplankton and fish in predicting the nighttime vertical distribution of *Mysis diluviana*." *Aquatic Biology* **5**(3): 263-279.
- Brainard, G. C. e. a. (2001). "Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor." *The Journal of Neuroscience* **21**(16): 8.
- Brandstätter, E. G. a. R. (2001). "Complex bird clocks." *The Royal society* **356**: 1801-1810.
- Bruning, A., F. Holker, S. Franke, T. Preuer and W. Kloas (2015). "Spotlight on fish: Light pollution affects circadian rhythms of European perch but does not cause stress." *Science of The Total Environment* **511**(0): 516-522.
- Buchanan, B. W. (1993). "Effects of enhanced lighting on the behaviour of nocturnal frogs." *Animal Behaviour* **45**(5): 893-899.
- Bulyuk, V. N., C. V. Bolshakov, A. Y. Sinelschikova and M. V. Vorotkov (2014). "Does the reaction of nocturnally migrating songbirds to the local light source depend on backlighting of the sky?" *Avian Ecology and Behavior* **25**: 21-26.
- Carrillo, M. (2006). "Manipulación fotoperiodica para controlar el crecimiento de los peces." Retrieved 09-abr-2015, from <http://www.ott.csic.es/rdcsc/rdcsicesp/rdbi27esp.htm>.
- CELMA (2007). GUIDE ON OBTRUSIVE LIGHT, CELMA.
- CIE (1997). Guidelines for minimizing sky glow. Vienna.
- CIE (2003). Guide on the limitation of the effects of obtrusive light from outdoor lighting installations. Vienna.
- Cinzano, P., F. Falchi and C. D. Elvidge (2001). "The first World Atlas of the artificial night sky brightness." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **328**(3): 689-707.
- CONSEJERIA-DE-MEDIO-AMBIENTE (2010). 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. D357/2010. CONSEJERIA-DE-MEDIO-AMBIENTE. Sevilla, JUNTA-ANDALUCIA.
- Cha, J. S., J. W. Lee, W. S. Lee, J. W. Jung, K. M. Lee, J. S. Han and J. H. Gu (2014). "Policy and status of light pollution management in Korea." *Lighting Research and Technology* **46**(1): 78-88.
- Chocho Ribas, E., Yunga, W. (2014). Zonificación para el Control de la polución lumínica aplicado a los cantones servidos por la empresa Electrica Regional Centro Sur CA. Ingeniería Eléctrica, Universidad de Cuenca.
- Dacke, M., E. Baird, M. Byrne, Clarke H. Scholtz and Eric J. Warrant (2013). "Dung Beetles Use the Milky Way for Orientation." *Current Biology* **23**(4): 298-300.
- DARKSKY. (2015). "What is Light Pollution. FAQ." Retrieved 27-jan-2015, from <http://www.darksky.org/about-ida/faqs#6>.
- Davies, T. W., J. Bennie and K. J. Gaston (2012). Street lighting changes the composition of invertebrate communities.
- DIAL. (2015). "Software Dialux." Retrieved 27-jan-2015, 2015, from <http://www.dial.de/DIAL/es/dialux/browse/12.html>.

-
- Dick, R. (2013). "Applied scotobiology in luminaire design." Lighting Research and Technology **0**: 17.
- Dolsa, G. and M. T. Albarrán (1998). La problemática de la contaminación lumínica en la conservación de la diversidad. I sesión de trabajo sobre contaminación lumínica, Barcelona.
- Domini, D. M. (2013). "Urban-like night illumination reduces melatonin release in European blackbirds (*Turdus merula*): implications of city life for biological time-keeping of songbirds." Frontiers in Zoology: 10.
- Dominoni, D., M. Quetting and J. Partecke (2013). Artificial light at night advances avian reproductive physiology.
- Dominoni, D. M., E. O. Carmona-Wagner, M. Hofmann, B. Kranstauber and J. Partecke (2013). "Individual-based measurements of light intensity provide new insights into the effects of artificial light at night on daily rhythms of urban-dwelling songbirds." Journal of Animal Ecology **83**(3): 681-692.
- Ecuador, E. d. (2008). "Estudio de Impacto Ambiental y Plan de Manejo Ambiental para la construcción y operación de un Lodge Ecológico en Puerto General Villamil (Isabela, Galápagos)." 138.
- EPA. (2014). Retrieved 12-nov-2014, from <http://www.epa.gov>.
- ETIBETAS. (2009). "La principal causa de muerte no natural en aves son las ventanas de vidrio." Retrieved 23-03-2015, from <http://matiascallone.blogspot.com.es/2009/05/la-principal-causa-de-muerte-no-natural.html>.
- Figueiro, M. G., K. Appleman, J. D. Bullough and M. S. Rea (2006). "A discussion of recommended standards for lighting in the newborn intensive care unit." J Perinatol **26**(S3): S19-S26.
- Froy, O., L. Gotter, A. et al (2003). "Illuminating the Circadian Clock in Monarch Butterfly Migration." Science **300**(5623): 1303-1305.
- Gallan, B. (2014). Becoming Crepuscular: rethinking the human relationship to day and night, University of Wollongong.
- Garcia Gil, M. (2001). Diagnòstic de contaminació lumínica i experiència pilot d'actuacions de millora a EL Masnou, UPC.
- Garcia Gil, M. (2013). "La eficiencia energética en el proceso de la iluminación." LUCES CEI **50**: 24-30.
- Garcia Gil, M. and R. Estrada Garcia (2014). Avaluació de l'Impacte Ambiental Lumínic (AIAL) de les instal·lacions d'enllumenat artificial nocturn a zones protegides de l'Àrea Metropolitana de Barcelona. UPC, UPC: 110.
- Garcia Gil, M. and J. Sanyé (2001). Estudio de la contaminación lumínica mediante medición de casos reales y simulaciones informáticas. Simposium Nacional de Alumbrado. CEI.
- Garstang, R. H. (1986). "Model for Artificial Night-Sky Illuminatio." Publications of the Astronomical Society of the Pacific **98**(601).
- Gaston, K. J., J. P. Duffy and J. Bennie (2015). "Quantifying the erosion of natural darkness in the global protected area system." Conservation Biology: n/a-n/a.
- Gaston, K. J., J. P. Duffy, S. Gaston, J. Bennie and D. T.W. (2014). "Human alteration of natural light cycles: causes and ecological consequences." Oecologia.
- GELighting. (2014). "General Electric Lighting Spain." 2014, from <http://www.gelighting.com/eucwc/eusp/login.html>.
- GENCAT (2001). Lle d'ordenació ambiental de l'enllumenament per a la protecció del medi nocturn. DOGC, GENCAT.

- GENCAT (2005). Reglament que desenvolupa la llei 6/2001 d'ordenació del medi natural nocturn. DOGC: 6.
- GENCAT. (2014). "Geoinformació. Protecció envers la contaminació lluminosa." Retrieved 02-feb-2015, from <http://sima.gencat.cat/Visors/PCL/Inici.html>.
- GEORGIA_SEA_TURTLE_CENTER. (2013, 02-dec-2013). 2013, from <http://www.georgiaseaturtlecenter.org>.
- Giannetto, C., F. Fazio, I. Vazzana, M. Panzera and G. Piccione (2011). "Comparison of cortisol and rectal temperature circadian rhythms in horses: the role of light/dark cycle and constant darkness." *Biological Rhythm Research* **43**(6): 681-687.
- Gómez-Lorente, D., O. Rabaza, A. Espín-Estrella and A. Peña-García (2013). Optimization of efficiency and energy saving in public lighting with multi-objective evolutionary algorithms. 11, EAEPQ.
- Gómez-Lorente, D., O. Rabaza, A. Espín Estrella and A. Peña-García (2013). "A new methodology for calculating roadway lighting design based on a multi-objective evolutionary algorithm." *Expert Systems with Applications* **40**(6): 2156-2164.
- Gómez Castaño, J., A. Sánchez de Miguel, J. Zamorano Calvo, C. Tapia Ayuga and J. Gallego (2013). Night Sky Brightness and Light Pollution in Comunidad de Madrid. LPTMM 2013, Smolenice, Slovak Republic.
- Hagen, O., R. Machado Santos, M. Nivert Schlindwein and V. Ravara Viviani (2015). "Artificial Night Lighting Reduces Firefly (Coleoptera: Lampyridae) Occurrence in Sorocaba, Brazil." *Advances in Entomology* **3**(1): 24-32.
- Hankins, M. W., S. N. Peirson and R. G. Foster (2008). "Melanopsin: an exciting photopigment." *Trends in Neurosciences* **31**(1): 27-36.
- Hart, P. (2015). "Bioluminescence and night phenomena." *Noctiluca Scintillans* Retrieved 23-gen-2015, 2015, from <http://wordlesstech.com/tag/noctiluca-scintillans/>.
- Holker, F., C. Wolter, E. K. Perkin and K. Tockner (2010). "Light pollution as a biodiversity threat." *Trends Ecol Evol* **25**(12): 681-682.
- Hollan, J. (2004). Metabolism-influencing light measurement by digital cameras. *Cancer and Rhythm*. Graz (Austria).
- Hori, M., K. Shibuya, M. Sato and Y. Saito (2014). "Lethal effects of short-wavelength visible light on insects." *Sci. Rep.* **4**.
- IGB, L.-I. o. F. E. a. I. F. (2015). "Loss of the Night Network." Retrieved 23-03-2015, from <http://www.cost-lonne.eu/>.
- Illinois_Coalition_for_Responsible_Outdoor_Lighting. (2011). "Fireflies and Lightbulbs: Does Manmade Light Impact Ecosystems?" Retrieved 26-jan-2015, 2015, from <http://www.illinoislighting.org/fireflies.html>.
- INDAL. (2002). "Manual de luminotecnica Indal." 2012, from <http://www.indal.es>.
- K. Perking, E., F. Holker and K. Tockner (2013). "The effects of artificial lighting on adult aquatic and terrestrial insects." *Freshwater Biologi*.
- Kempnaers, B., P. Borgström, P. Loës, E. Schlicht and M. Valcu (2010). "Artificial Night Lighting Affects Dawn Song, Extra-Pair Siring Success, and Lay Date in Songbirds." *Current Biology* **20**(19): 1735-1739.
- Kinver, M. (2010). "Nueva York "apaga" las luces para ayudar a aves migratorias." Retrieved 23-03-2015, from http://www.bbc.co.uk/mundo/ciencia_tecnologia/2010/09/100902_nueva_york_luces_migracion_aves_jrg.shtml.

-
- Kloog, I., A. Haim, R. G. Stevens and B. A. Portnov (2009). "Global co-distribution of light at night (LAN) and cancers of prostate, colon, and lung in men." Chronobiol Int **26**(1): 108-125.
- Kloog, I., B. A. Portnov, H. S. Rennert and A. Haim (2011). "Does the modern urbanized sleeping habitat pose a breast cancer risk?" Chronobiol Int **28**(1): 76-80.
- Kramer, K. and E. Birney (2001). "Effect of light intensity on activity patterns of Patagonian leaf-eared mice,." Journal of Mammalogy **82**(2): 535-544.
- Krishnan, N., K. Rakshit, E. S. Chow, J. S. Wentzell, D. Kretzschmar and J. M. Giebultowicz (2012). "Loss of circadian clock accelerates aging in neurodegeneration-prone mutants." Neurobiology of Disease **45**(3): 1129-1135.
- Kurvers, R. H. J. M. and F. Hölker (2014). "Bright nights and social interactions: a neglected issue." Behavioral Ecology.
- Kyba, C. C. M. (2014). "Artificial light and trees." Retrieved 02-feb-2015, from <http://lossofthenight.blogspot.de/2014/12/artificial-light-and-trees.html>.
- Lacoeuilhe, A., N. Machon, J. F. Julien, A. Le Bocq and C. Kerbiriou (2014). "The Influence of Low Intensities of Light Pollution on Bat Communities in a Semi-Natural Context." PLOS **9**(10): e103042.
- Le Tallec, T., M. Perret and M. Théry (2013). "Light Pollution Modifies the Expression of Daily Rhythms and Behavior Patterns in a Nocturnal Primate." PLOS.org **8**(11).
- Loeb, A. and E. Turner (2012). "Detection Technique for Artificially Illuminated Objects in the Outer Solar System and Beyond." Astrobiology **12**: 290-294.
- Longcore, T., Rich C. (2004). "Ecological light pollution." Frontiers in Ecology and the Environment **2**(4): 191-198.
- Lowe, E. C., S. M. Wilder and D. F. Hochuli (2014). "Urbanisation at Multiple Scales Is Associated with Larger Size and Higher Fecundity of an Orb-Weaving Spider." PLOS **9**(8).
- M. Cryan, P. e. a. (2014). "Behavior of bats at wind turbines." Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America: 6.
- Macgregor, C. J., M. J. O. Pocock, R. Fox and D. M. Evans (2014). "Pollination by nocturnal Lepidoptera, and the effects of light pollution: a review." Ecological Entomology: n/a-n/a.
- Marris, E. (2010). "In search of dark nights." Retrieved 24-jan-2015, from <http://www.nature.com/news/2010/100707/full/news.2010.339.html>.
- Mayhew, C. and R. Simmon. (2000). "Earth at night." Retrieved 27-jan-2015, from <http://visibleearth.nasa.gov/view.php?id=55167>.
- McLntyre, I. M., T. R. Norman, G. D. Burrows and S. M. Armstrong (1989). "Human Melatonin Suppression by Light is Intensity Dependent." Journal of Pineal Research **6**(2): 149-156.
- Middleton, B., B. M. Stone and J. Arendt (2002). "Human circadian phase in 12:12 h, 200:<8 lux and 1000:<8 lux light-dark cycles, without scheduled sleep or activity." Neuroscience Letters **329**(1): 41-44.
- MINISTERIO-DE-INDUSTRIA (2008). 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. T. y. C. Ministerio de Industria. BOE. **279**: 45988-46057.
- MINISTERIO-DE-MEDIO-AMBIENTE (2013). Norma para la emisión de la regulación de la contaminación lumínica , elaborada a partir de la revisión del Decreto No. 686 de 1998, del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. **Decreto 43**: 8.

- Minnaar, C., J. G. Boyles, I. A. Minnaar, C. L. Sole and A. E. McKechnie (2014). "Stacking the odds: light pollution may shift the balance in an ancient predator–prey arms race." Journal of Applied Ecology: n/a-n/a.
- Montevecchi, W. A. (2006). Influences of artificial light on marine birds. Ecological Consequences of Artificial Night Lighting. T. Longcore and C. Rich. Washington, D.C., Island Press: 94-113.
- Mula Laguna, J., Barbara, N., Metzger B. (2014). Light pollution impact on "tubenose" seabirds: an overview of areas of concern in the Maltese Islands. M. Birdlife, Birdlife, Malta: 15.
- National-Science-Foundations. (2011). "Nighttime lights clarify economic activity: Combining lights and statistics may yield high-resolution global economic data." ScienceDaily. Retrieved 27-jan-2015, from <http://www.sciencedaily.com/releases/2011/06/110611121711.htm>.
- National_Park_Service_U.S. (2013). "Growth of Light Pollution." Retrieved 27-jan-2015, from <http://www.nature.nps.gov/night/growth.cfm>.
- News, B. (2015). "New York state to dim lights to save migrating birds." Retrieved 30-abr-2015, from <http://www.bbc.com/news/world-us-canada-32491715>.
- NOAA. (2015). "Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS)." Retrieved 26-jan-2015, from <http://npp.gsfc.nasa.gov/viirs.html>.
- Novak , T. e. a. (2014). "Classification of environmental zones in the Czech Republic." Lighting Research and Technology **46**: 9.
- Obayashi, K., et all (2014). "Association between light exposure at night and nighttime blood pressure in the elderly independent of nocturnal urinary melatonin excretion." Chronobiology International.
- Ortiz-Tudela, E., M. d. l. Á. Bonmatí-Carrión, M. De la Fuente and P. Mendiola (2012). "La cronodisrupción como causa de envejecimiento." Revista Española de Geriatria y Gerontología **47**(4): 168-173.
- OSRAM. (2014). "OSRAM.com." Retrieved 2014, from http://www.osram.com/osram_com/.
- Packer, C., A. Swanson, D. Ikanda and H. Kushnir (2011). "Fear of Darkness, the Full Moon and the Nocturnal Ecology of African Lions." PLOS.org: 4.
- Pauley, S. M. (2004). Lighting for the Human Circadian Clock. Recent Research Indicates That Lighting Has Become a Public Health Issue.
- .
- Peplonska, B., A. Bukowska, W. Sobala, E. Reszka, J. Gromadzińska, W. Wasowicz, J. A. Lie, H. Kjuus and G. Ursin (2012). "Rotating night shift work and mammographic density." Cancer Epidemiology Biomarkers & Prevention.
- Perkin, E. K., F. Hölker, J. S. Richardson, J. P. Sadler, C. Wolter and K. Tockner (2011). "The influence of artificial light on stream and riparian ecosystems: questions, challenges, and perspectives." Ecosphere **2**(11): art122.
- Perkin, E. K., F. Hölker, K. Tockner and J. S. Richardson (2014). "Artificial light as a disturbance to light-naïve streams." John Wiley & Sons Ltd.
- PhilipsLighting. (2015). "Catálogos y descargas." Retrieved 27-jan-2015, 2005, from http://www.lighting.philips.es/connect/tools_literature/.
- Pilar, E. (2012). "Fuerteventura se "apaga" por la parda." Retrieved 26-jan-2015, 2012, from <http://www.abc.es/20121106/natural-biodiversidad/abci-fuerteventura-pardela-contaminacion-luminica-201211061110.html>.
- Poiani, S., C. Dietrich, A. Barroso and A. Costa-Leonardo (2015). "Effects of residential energy-saving lamps on the attraction of nocturnal insects." Lighting Research and Technology **47**(3): 338-348.

-
- RAE. (2015). Retrieved 27-jan-2015, from <http://www.rae.es>.
- Rahmah, S., S. Senoo and G. Kawamura (2013). "Photoresponse ontogeny and its relation to development of pineal organ and eye in larval bagrid catfish *Mystus nemurus* (Valenciennes)." Marine and Freshwater Behaviour and Physiology **46**(6): 367-379.
- Raine, H. (2007). Light pollution and its effect on Yelkouan Shearwaters in Malta; causes and solutions. B. Malta, BirdLife Malta: 55.
- Ramos-Salvat, G. (2014). Una Tortuga marina pone huevos por primera vez en la playa de Tarragona. El País. Tarragona.
- Rea, M. (2015). "The lumen seen in a new light: Making distinctions between light, lighting and neuroscience." Lighting Research and Technology **47**(3): 259-280.
- Relux. (2015). "Relux light simulation tools." Retrieved 27-jan-2015, 2015, from <http://www.relux.biz/index.php?lang=es>.
- Rich, C. and T. Longcore (2006). Ecological Consequences of Artificial Night Lighting. Washington, DC, Island Press.
- Riley, W. D., B. Bendall, M. J. Ives, N. J. Edmonds and D. L. Maxwell (2012). "Street lighting disrupts the diel migratory pattern of wild Atlantic salmon, *Salmo salar* L., smolts leaving their natal stream." Aquaculture **330**â€"333(0): 74-81.
- Rivas, M. L., P. Santidrián Tomillo, J. Diéguez Uribeondo and A. Marco (2015). "Leatherback hatchling sea-finding in response to artificial lighting: Interaction between wavelength and moonlight." Journal of Experimental Marine Biology and Ecology **463**(0): 143-149.
- Rodríguez, A., B. Rodríguez and M. P. Lucas (2011). "Trends in numbers of petrels attracted to artificial lights suggest population declines in Tenerife, Canary Islands." IBIS. The International Journal of Avian Science.
- Rol, M. A., B. Otálora, A. Martíñez Nicolás, B. MA, E. Ortiz-Tudela, R. Arguelles-Prieto, M. Martínez-Madrid and J. Madrid (2014). ¿Puede la luz afectar a nuestra Salud? El lado oscuro de la luz. Contaminación Lumínica. A. d. Murcia. Murcia: 59-66.
- Sanchez de Miguel, A. (2015). "Evolución del gasto en alumbrado público en España." Retrieved 23-01-2015, 2015, from <http://guaix.fis.ucm.es/evolucionconsumo>.
- Santos, C., A. C. Miranda, J. Granaderiro, P. Lourenço, J. Saraiva and J. Palmerim (2010). "Effects of artificial illumination on the nocturnal foraging of waders." Acta Oecologica **26**(2): 166-173.
- Saper, C. B., T. E. Scammell and J. Lu (2005). "Hypothalamic regulation of sleep and circadian rhythms." Nature **437**(7063): 1257-1263.
- Schoech, S. J., R. Bowman, T. P. Hahn, W. Goymann, I. Schwabl and E. S. Bridge (2013). "The effects of low levels of light at night upon the endocrine physiology of western scrub-jays (*Aphelocoma californica*)." Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological Genetics and Physiology **319**(9): 527-538.
- Solano Lamphar, H. (2010). Medición de la contaminación lumínica en espacios naturales, UPC.
- STARLIGHT (2007). Starlight. A common heritage.
- Tapia, C., A. Sanchez de Miguel and J. Zamorano (2015). LICA-UCM lamps spectral database v 1.6. Universidad Complutense de Madrid, Universidad Complutense de Madrid.
- Thapan, K., J. Arendt and D. J. Skene (2001). "An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans." The Journal of Physiology **535**(Pt 1): 261-267.
- Torra, J. and R. San Martín Páramo (2001). Pla pilot per a l'avaluació i reducció de la contaminació lumínica a Catalunya. GENCAT, GENCAT.

- Troy, J. R., N. D. Holmes and M. C. Green (2011). "Modeling artificial light viewed by fledgling seabirds." Ecosphere **2**(10): art109.
- Tuhárska, M. e. a. (2014). "Intensity of light pollution and its impact on phenological phases of trees." Mendel a bioklimatologie.
- Tyler Miller, G. (1996). Ecología y Medio Ambiente, Grupo Editorial Iberoamerica.
- Viola, A. U., L. M. James, L. J. Schlangen and D. J. Dijk (2008). "Blue-enriched white light in the workplace improves self-reported alertness, performance and sleep quality." Scand J Work Environ Health **34**(4): 297-306.
- Wada, K., C. Nagata, K. Nakamura, S. Iwasa, M. Shiraki and H. Shimizu (2012). "Light exposure at night, sleep duration and sex hormone levels in pregnant Japanese women." Endocr J **59**(5): 393-398.
- Walker, M. F. (1976). " Identification and protection of existing and potential observatory sites." Trans. Int. Astron. Union (Reports on Astronomy) **16A**(1): 219 - 228.
- Walker, M. F. (1977). "The effects of urban lighting on the brightness of the night sky." The effects of urban lighting on the brightness of the night sky **89**: 405-409.
- Wang, P., F.-M. Ren, Y. Lin, F.-X. Su, W.-H. Jia, X.-F. Su, L.-Y. Tang and Z.-F. Ren (2014). "Night shift work, sleep duration, daytime napping, and breast cancer risk." Sleep Medicine(0).
- Wilhelm, S. I., J. J. Schau, E. Schau, S. M. Dooley, D. L. Wiseman and H. A. Hogan (2013). "Atlantic Puffins are Attracted to Coastal Communities in Eastern Newfoundland." Northeastern Naturalist **20**(4): 624-630.
- Zamorano, J., A. Sanchez de Miguel, S. Pascual Ramírez, J. Gomez Castaño, P. Ramirez Moreta and P. Challupner (2011). ISS nocturnal images as a scientific tool against Light Pollution

3. Cuantificación de la CL

- Albers, S. and D. Duriscoe (2001). Modeling light pollution from population data and implications for National Park Service lands. George Wright Forum.
- Aube, M., L. Franchomme-Fosse, P. Robert-Staehler and V. Houle (2005). Light pollution modelling and detection in a heterogeneous environment: toward a night-time aerosol optical depth retrieval method.
- Aubé, M., J. Roby and M. Kocifaj (2013). "Evaluating Potential Spectral Impacts of Various Artificial Lights on Melatonin Suppression, Photosynthesis, and Star Visibility." PLoS ONE **8**(7): e67798.
- Berry, R. L. (1973). "Light Pollution in Southern Ontario." Journal of the Royal Astronomical Society of Canada **70**: 97.
- Bessolaz, N. (2009). Towards an efficient control of light pollution : the optimization of the public lighting system from an accurate modeling of light pollution. LICORNESS.
- CIE (2015). Report on the First International Workshop on Circadian and Neurophysiological Photometry. **CIE TN 003:2015**: 39.
- Davies, T. W., J. Bennie, I. R. and K. J. Gaston (2013). Artificial light alters natural regimes of night-time sky brightness. Exeter, Environment and Sustainability Institutem , University of Exeter.
- Dominoni, D. (2015). "The effects of light pollution on biological rhythms of birds: an integrated, mechanistic perspective." Journal of Ornithology: 1-10.
- García Gil, M. (2009). Metodología ramal-UPC para análisis cuantitativo de la contaminación luminica. XXXV Simposium del Comité Español de Iluminación. CEI. Pontevedra.
- Garstang, R. H. (1991). Light Pollution Modeling. Radio Interference, and Space Debris. Washington, ASP Conference Series. **17**.

-
- Gaston, K. J., J. Bennie, T. W. Davies and J. Hopkins (2013). "The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal." Biol Rev Camb Philos Soc **88**(4): 912-927.
- Gaston, K. J., T. W. Davies, J. Bennie and J. Hopkins (2012). "REVIEW: Reducing the ecological consequences of night-time light pollution: options and developments." Journal of Applied Ecology **49**(6): 1256-1266.
- Kocifaj, M. (2007). "Light-pollution model for cloudy and cloudless night skies with ground-based light sources." Appl Opt **46**(15): 3013-3022.
- Kocifaj, M. (2011). "A numerical experiment on light pollution from distant sources." Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **415**(4): 3609-3615.
- Kocifaj, M. (2013). "Night sky luminance under clear sky conditions: Theory vs. experiment." Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer **139**(0): 43-51.
- Kocifaj, M. (2015). "SkyGlow Simulator." Retrieved 17-03-2015, 2015, from <http://www.unisky.sav.sk/?lang=en&page=aplikacia&subpage=glow>.
- Kocifaj, M. and H. Solano (2014). On the relation between zenith sky brightness and horizontal illuminance. Monthly notices of Royal Astronomical Society: 8.
- Kocifaj, M., Solano, H (2014). "Quantitative analysis of night skyglow amplification under cloudy conditions " Journal of astronomical society **443**: 12.
- Kyba, C. C. M., A. Hanel and F. Holker (2014). "Redefining efficiency for outdoor lighting." Energy & Environmental Science **7**(6): 1806-1809.
- Kyba, C. C. M., T. Ruhtz, J. Fischer and F. Hölker (2012). "Red is the new black: how the colour of urban skyglow varies with cloud cover." Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **425**(1): 701-708.
- Kyba, C. C. M., T. Ruhtz, J. r. Fischer and F. Hölker (2011). "Cloud Coverage Acts as an Amplifier for Ecological Light Pollution in Urban Ecosystems." PLoS ONE **6**(3): e17307.
- Kyba, C. M. and F. Hölker (2013). "Do artificially illuminated skies affect biodiversity in nocturnal landscapes?" Landscape Ecology **28**(9): 1637-1640.
- Lucas, R. J. e. a. (2013). "Measuring and using light in the melanopsin age." TRENDS in Neurosciences: 9.
- Luginbuhl, C. B., P. A. Boley and D. R. Davis (2013). "The impact of light source spectral power distribution on sky glow." Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer **139**(0): 21-26.
- Luginbuhl, C. B., D. M. Duriscoe, C. W. Moore, A. Richman, G. W. Lockwood and D. R. Davis (2009). "From the Ground Up II: Sky Glow and Near-Ground Artificial Light Propagation in Flagstaff, Arizona." Publications of the Astronomical Society of the Pacific **121**(876): 204-212.
- Luginbuhl, C. B., C. E. Walker and R. J. Wainscoat (2009). "Lighting and astronomy." Physics Today **62**(12): 32.
- Meng, Y., Z. He, J. Yin, Y. Zhang and T. Zhang (2011). "Quantitative calculation of human melatonin suppression induced by inappropriate light at night." Med Biol Eng Comput **49**(9): 1083-1088.
- Pawsonl, S. M., Bader M. K.-F. (2014). "LED lighting increases the ecological impact of light pollution irrespective of color temperature." Ecological Applications **24**(7): 1561-1568.
- Perez García, M. (2014). "Se buscan voluntarios para combatir la contaminación lumínica." Retrieved 18-03-2015, 2015, from http://elpais.com/elpais/2014/10/01/ciencia/1412150593_038450.html.
- Pike, R. (1976). "A Simple Computer Model for the Growth of Light Pollution." Journal of the Royal Astronomical Society of Canada **70**.

- Pun, C. S. J., C. W. So, W. Y. Leung and C. F. Wong (2014). "Contributions of artificial lighting sources on light pollution in Hong Kong measured through a night sky brightness monitoring network." Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer **139**(0): 90-108.
- Rea MS and Figueiro MG (2013). "A Working Threshold for Acute Nocturnal Melatonin Suppression from "White" Light Sources used in Architectural Applications." J Carcinogenesis Mutagenesis **4**(3).
- Rea MS, Figueiro MG, Bierman A and H. R (2012). "Corrigendum." Lighting Research and Technology **44**(4): 516.
- Rea, M. S., J. D. Bullough and M. G. Figueiro (2001). "Human melatonin suppression by light: a case for scotopic efficiency." Neuroscience Letters **299**(1-2): 45-48.
- Rea, M. S., M. G. Figueiro, A. Bierman and J. D. Bullough (2010). "Circadian light." J Circadian Rhythms **8**(1): 2.
- Rea, M. S., M. G. Figueiro, A. Bierman and R. Hamner (2012). "Modelling the spectral sensitivity of the human circadian system." Lighting Research and Technology **44**(4): 386-396.
- Rea, M. S., M. G. Figueiro, J. D. Bullough and A. Bierman (2005). "A model of phototransduction by the human circadian system." Brain Research Reviews **50**(2): 213-228.
- Sanchez de Miguel, A., J. Gomez Castano, J. Zamorano, S. Pascual, M. Angeles, L. Cayuela, G. Martin Martinez, P. Challupner and C. Kyba (2014). "Atlas of astronaut photos of Earth at night." ASTRONOMY & GEOPHYSICS **55**(4): 36-36.
- Sanchez de Miguel, A. e. a. (2010). Contaminación Lumínica en España 2010 IX Meeting of the Spanish Astronomical Society (SEA) Madrid, Madrid, SEA.
- So, C.-w. (2014). Observational studies of contributions of artificial and natural light factors to the night sky brightness measured through a monitoring network in Hong Kong. Doctor of Philosophy, University of Hong Kong.
- Spoelstra, H. (2013). "Night sky brightness monogram " Retrieved 01-nov-2013, 2013, from <http://www.darkskiesawareness.org/>.
- Treanor, P. J. (1973). "A simple propagation law for artificial night-sky illumination." The Observatory **93**: 117-120.
- UCM-Darksky-group. (2014). Retrieved 26-feb-2015, from http://www.citiesatnight.org/index_EN.html.
- 4. Metodología de investigación**
- AMB. (2014). "Area Metropolitana de Barcelona." Retrieved 05-nov-2014, from <http://www.amb.cat>.
- Bará, S. (2015). "Galician Night Sky Brightness Monitoring Network." Retrieved 24-jan-2015, from <http://webspersoais.usc.es/persoais/salva.bara/GalicianNSBnetwork.html>.
- CANON. (2004). "Canon EOS 300d Asistencia de producto." Retrieved 12-jan-2015, from http://www.canon.es/Support/Consumer_Products/products/cameras/Digital_SLR/EOS_300D.aspx.
- Casas Fernandez, E. (2015). Metodologia amb càmera fotogràfica per a mesurar la llum intrusa UPC.
- Cinzano, P. (2005). Night Sky Photometry with Sky Quality Meter. UNIHEDRON: 14.
- DPREVIEW. (2000). "Nikon Coolpix 990 Revuew." Retrieved 12-jan-2015, from <http://www.dpreview.com/reviews/nikoncp990>.
- ELPAIS. (2014). "Astronomía Sierra Morena." Retrieved 04-feb-2015, from <http://elpais.com/publi-especial/astronomia-sierra-morena/>.

-
- García Gil, M. (2011). Guía para la elección de niveles lumínicos en zonas urbanas: 61.
- GOSSEN. (2015). "MAVO-SPOT 2 USB." Retrieved 18-jan-2015, from http://www.gossen-photo.de/english/licht_p_mavospot.php.
- Günter, P. (2015). "Leuchtender Teppich auf dem Meer." *Frankfurter Allgemeine* Retrieved 07-jul-2015, from <http://www.faz.net/aktuell/wissen/weltraum/lichtspielhaus-erde-3-leuchtender-teppich-auf-dem-meer-13611338.html>.
- ITEC. (2014). "ASTMON - Monitores de contaminación lumínica." Retrieved 12-jan-2015, from <http://astro-itec.es/ASTMON>.
- Jacobs, A. (2011). "WebHDR." Retrieved 27-jan-2015, from <http://www.jaloxa.eu/webhdr/index.shtml>.
- PRC.Krochmann. (2015). "RadioLux 111." Retrieved 27-jan-2015, from <http://www.prc-krochmann.de/index.php/radiometer>.
- Rabaza, O., F. Aznar-Dols, M. Mercado-Vargas and A. Espín-Estrella (2014). "A new method of measuring and monitoring light pollution in the night sky." *Lighting Research and Technology* **46**(1): 5-19.
- Rabaza, O., D. Galadí-Enríquez, A. E. Estrella and F. A. Dols (2010). "All-Sky brightness monitoring of light pollution with astronomical methods." *Journal of Environmental Management* **91**(6): 1278-1287.
- REECL (2015). Propuesta de clasificación de calidad de cielo que propone el Servei Per la Prevenció de la Contaminació Acústica i Llumínosa de la Generalitat de Catalunya, UCM: 6.
- REECL. (2015). "Red Española de Estudios de Contaminación Lumínica SQM network " Retrieved 27-jan-2015, from <http://quaix.fis.ucm.es/splpr/SQM-REECL>.
- Ward, G. (1998). Page on High Dynamic Range Image Encodings.
- WIKANDA. (2015). "Huelvopedia." Retrieved 16-abr-2015, from <http://huelvopedia.wikanda.es/>.
- Wikipedia. (2015). "High-dynamic-range imaging." Retrieved 27-jan-2015, from http://en.wikipedia.org/wiki/High-dynamic-range_imaging.

5. Trabajo de Campo

- Estrada-García, R., M. García-Gil, L. Acosta, S. Bará, A. Sanchez-de-Miguel and J. Zamorano (2015). "Statistical modelling and satellite monitoring of upward light from public lighting." *Lighting Research and Technology*.
- Gómez Fernández, M. C. (2015). Diseño del estudio de impacto ambiental de alumbrado público en el parque natural del Delta del Ebro, UPC.
- P.N.Delta-Ebro. (2015). "Parque Natural del Delta del Ebro." 2015, from <http://ebre.info/>.
- P.N.Sierra-Morena. (2014). 2014, from <http://sierramorena.com/starlight.php>.
- Sanchez-de-Miguel, A. (2015). Variación espacial, temporal y espectral de la contaminación lumínica y sus fuentes: Metodología y resultado. PhD thesis, Universidad Complutense de Madrid.

6. Propuesta Metodología

- Aubé, M. and M. Kocifaj (2012). "Using two light-pollution models to investigate artificial sky radiances at Canary Islands observatories." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **422**(1): 819-830.
- Estrada García, R. (2013). Quantificació de l'impacte mediambiental lumínic en una renovació d'instal·lacions, UPC.
- Gaston, K. (2013). "The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal." *Biological Reviews* **88**: 16.

Rea, M. S., M. G. Figueiro, J. D. Bullough and A. Bierman (2007). "Corrigendum to "A model of phototransduction by the human circadian system" [Brain Res. Rev. 50/2 (2005) 213–228]." Brain Research Reviews **56**(1): 270.