

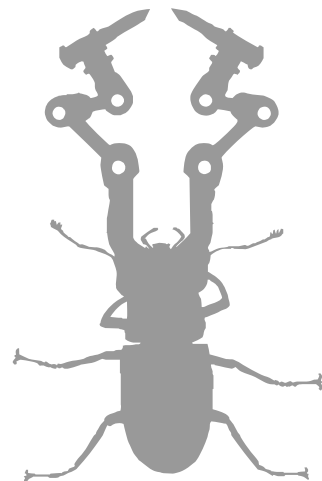


UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

→ **UPCGRAU**

Contaminación lumínica. → Una visión desde el foco contaminante: el alumbrado artificial

Manuel García Gil, editor
Ramón San Martín Páramo
Héctor Solano Lamphar
Pau Francia Payàs



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH



iniciativa
digital politècnica
Publicacions Acadèmiques UPC

→ **UPCGRAU**

Contaminación lumínica. →
Una visión desde el foco contaminante: el alumbrado artificial

Manuel García Gil, editor
Ramón San Martín Páramo
Héctor Solano Lamphar
Pau Francia Payàs

Primera edición: abril de 2012

Diseño y dibujo de la cubierta: Jordi Soldevila

Diseño maqueta interior: Jordi Soldevila

Imagen de la cubierta: Manuel García Gil

© Los autores, 2012

© Iniciativa Digital Politècnica, 2012
Oficina de Publicacions Acadèmiques Digitals de la UPC
Jordi Girona Salgado 31,
Edifici Torre Girona, Planta 1,
08034 Barcelona
Tel.: 934 015 885 Fax: 934 054 101
www.upc.edu/idp
E-mail: info.idp@upc.edu

DL: B-17949-2012

ISBN: 978-84-7653-956-9

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra sólo puede realizarse con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista en la ley.



Índice

Prefacio

1. La contaminación lumínica

1.1. El fenómeno	11
1.2. Las causas de la CL	15
1.3. Efectos de la CL	17

2. Análisis del foco contaminante. El alumbrado artificial

2.1. El alumbrado artificial. Generalidades	23
2.2. Condiciones lumínicas	26
2.3. Sistemas lumínicos de alumbrado artificial	30
2.4. Dimensionado y cálculo de iluminación	49
2.5. Gestión del servicio lumínico en el tiempo	52
2.6. Medidas para disminuir la CL	54

3. Situación a escala mundial.

3.1. Situación geográfica y evolución	59
3.2. Normativa aplicable	65

4. Cuantificación de la contaminación lumínica

4.1. Influencia de las fuentes de luz	75
4.2. Influencia de las luminarias	79
4.3. Método RAMA-L: cuantificación de la emisión contaminante en una instalación	80
4.4. Modelización matemática de la CL según la influencia de los factores externos	97

Apéndices

Proceso de investigación en los efectos de la CL	107
Desarrollo e investigación de la modelización matemática de la CL	127

Bibliografía





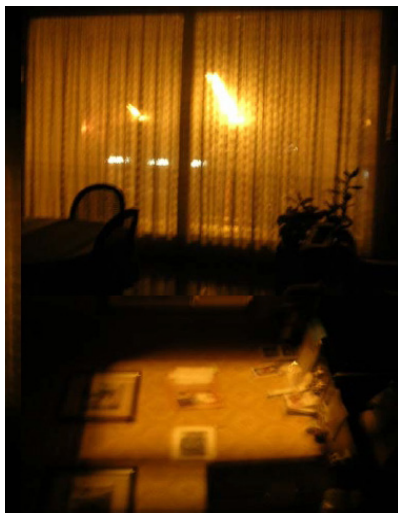
Prefacio

Circulando de noche por una carretera interurbana, es frecuente observar en el horizonte un “halo de luz”, un resplandor luminoso que, si coincide con la dirección en que circulamos, va ocupando una porción cada vez mayor del cielo nocturno hasta descubrir, finalmente, las luces de una población.



Acaso cuando ese resplandor era sólo una pequeña mancha en el horizonte podíamos ver estrellas en el cielo nocturno. Pero, a medida que nos acercamos, el resplandor va “borrando” las más débiles, va disminuyendo el número de astros visibles hasta desaparecer casi totalmente.

Por la noche, desvelados, hambrientos, intranquilos, aburridos..., deambulamos por nuestra casa. No es necesario encender las luces, pues la claridad que llega a través de las ventanas es suficiente para que podamos reconocer nuestro camino y los posibles obstáculos...



Estas tres situaciones son habituales hoy en día: luces de otro lugar invaden nuestro entorno. El fenómeno que origina esta invasión es la denominada *contaminación lumínica*, el tema de este libro.

La sociedad actual ilumina durante la noche –artificialmente, al carecer de la luz del Sol– los espacios de la actividad humana. Pero, por un conjunto de factores que describiremos más adelante, es muy difícil mantener la luz estrictamente en el espacio al que está destinada: por reflexión, difracción, ineptitud, error..., “desborda hacia el exterior”, en principio hacia las zonas próximas aunque, a menudo, a una distancia de cientos de kilómetros.

Las situaciones anecdóticas que hemos utilizado para describir la incidencia de la contaminación lumínica son situaciones individuales. Pero hemos de tener en cuenta que esos individuos son “todos y cada uno” de nosotros, y que las situaciones en las que se produce esta incidencia se originan cada vez con más frecuencia, proximidad e intensidad.

Cuando, a continuación, despluguemos temas que puedan parecer meramente “técnicos”, no olvidemos que la contaminación lumínica es hoy un fenómeno de alcance social y mundial, de cuyas repercusiones no estamos quizás debidamente informados.

El contenido se divide en diferentes temáticas, a menudo entrelazadas por la necesidad del hilo de narración:

- *Conocimiento de la temática:* Apartados 1, del 2.1 al 2.5 y el 3.1. Son aquellos en los que se expone qué es este tipo de contaminación, sobre que afecta, de dónde procede y cuál es su situación actual.
- *Herramientas técnicas de aplicación:* Apartados 2.6 al 3.2 y del 4.1 al 4.3. Donde se proporcionaran cifras y magnitudes para poder evaluar, comparar y minimizar la problemática; principalmente desde el punto de vista del alumbrado artificial y su diseño.

- *Modelización matemática*: Apartado 4.4. En él se formula un modelo para poder medir la influencia de una instalación lumínica en el incremento del resplandor luminoso del cielo natural nocturno.
- Ampliación de conceptos y múltiple bibliografía asociada: En los apéndices

→ 1



La contaminación lumínica

1.1. El fenómeno

La Contaminación Lumínica (en adelante, CL) se puede definir como:

“Cualquier afectación al medio natural que esté ocasionada por la iluminación artificial nocturna. Estas afectaciones son el resplandor luminoso de la cúpula celeste, la luz intrusa en hábitats naturales oscuros, el deslumbramiento y el consumo energético.”

Este fenómeno se da desde que la actividad humana empezó a utilizar la noche para el desarrollo de su civilización. A pesar de ello, no fue hasta los años sesenta del siglo xx cuando un grupo de astrónomos alertaron de las dificultades crecientes que tenían para conseguir hacer mediciones y observaciones en condiciones de oscuridad nocturna natural. A continuación, se puede observar una sucesión de imágenes de Los Ángeles (EE.UU.), captadas desde el Monte Wilson:



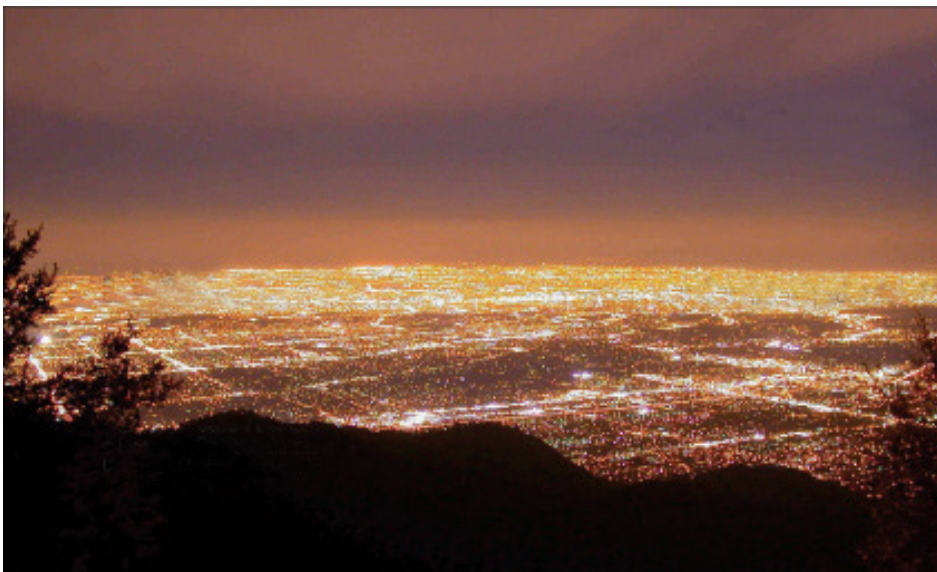
Los Ángeles, 1908



Los Ángeles, 1988



Los Ángeles, 2002
Fuente: Ecological
Consequences of Artificial
Night Lighting. Prof.
Dr. Gerhard Eisenbeis,
Fachbereich Biologie,
Institut für Zoologie,
Mainz, Deutschland
<http://www.uni-mainz.de/FB/Biologie/Zoologie/abt1/eisenbeis/Homepage_Licht_Umwelt.htm>



A medida que las eficiencias energéticas y las formas de los sistemas de alumbrado han ido aumentando, se han elevado los niveles de iluminación y, por tanto, la luz nocturna. Esta luz escapa de las ciudades y crea un halo de luz alrededor de ellas que se difumina por el cielo y llena la noche natural de este **resplandor luminoso**. Este halo es debido a la reflexión o refracción de la luz en las partículas que forman la atmósfera (átomos o partículas en suspensión).



La luz de las ciudades va hacia la atmósfera y rebota en las partículas de la atmósfera, que la devuelven. Así se crea el resplandor luminoso (Fuente: elaboración propia)



También desde el espacio se puede ver el cambio de la morfología de la noche, como puntos brillantes sobre la superficie de la Tierra:



Vista de un anochecer en su paso por la Península Ibérica (Fuente: <<http://www.celfosc.org>>)

Otra alteración del medio es la *intrusión de luz artificial* en lugares donde afecta a los seres vivos, ya sean vegetales, animales... Las siguientes imágenes ilustran casos de intrusión de luz artificial en hábitat nocturnos o de descanso (viviendas) que afecta la actividad que se desarrolla en ellos:



Ejemplos de afectación de luz intrusa en viviendas



Animales nocturnos que necesitan la oscuridad para su actividad



Toda esa luz que provoca este fenómeno ocasiona unas *pérdidas energéticas* importantes. En este sentido, hay que mencionar que el peso específico del consumo eléctrico del alumbrado público llega a representar incluso el 50% del consumo eléctrico total de algunos ayuntamientos.

Para el caso de España, podemos considerar los siguientes datos para apreciar la importancia del vector de análisis energético:

Total de unidades:	5.000.000 luminarias
Crecimiento anual:	2,6%
Consumo de energía:	4.000.000 MWh
Coste energético:	280 millones de euros

Como puede apreciarse, la magnitud del consumo y de la inversión es verdaderamente significativa. Además, el alumbrado público no es el único responsable de la CL: otros tipos de alumbrados exteriores (deportivos, comerciales y publicitarios, polígonos industriales, etc.) también contribuyen al problema, en una proporción que debe estimarse en torno al 20 %, como mínimo.



Estos datos, traducidos a una forma de ver la *incidencia en el medio ambiente*, resultan ser:

Energía final:	380.000	toneladas equivalentes de petróleo
Energía primaria:	1.230.000	toneladas equivalentes de petróleo
Emisiones de CO ₂ :	3.300.000	toneladas de CO ₂

1.2. Las causas de la CL

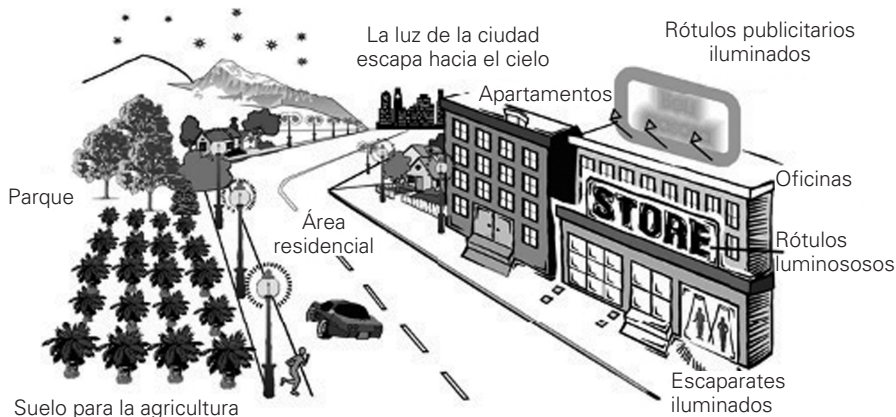
En la vida y en sociedad urbana actuales, la necesidad de iluminar está muy aceptada. En estos espacios y tiempos, no se siguen los ritmos naturales de día y noche. Cada vez es más frecuente que un número creciente de actividades humanas se trasladen a horas nocturnas. Este es el caso, por ejemplo, del suministro de mercancías, de determinados viajes y desplazamientos, espectáculos, eventos deportivos...

Todas estas actividades nocturnas necesitan el apoyo del alumbrado para:

- Crear unas condiciones de seguridad ciudadana.
- Mejorar la seguridad en la circulación de carreteras, vías, calles...
- Dar fluidez y comodidad de la actividad.
- Evitar riesgos y accidentes en la actividad.
- Permitir la actividad social entre el individuo y aumentar la actividad económica.
- Dar un nuevo aspecto a las ciudades, mediante la iluminación de fachadas, ornamental...
- Etc.

Es evidente que el *alumbrado* persigue un objeto importantísimo en nuestra sociedad: el *servicio al ser humano*.

Según de quien sea la propiedad del alumbrado, este puede ser público o privado, por lo que puede provenir de farolas, rótulos luminosos, escaparates, ventanas...



Ciudad imaginaria donde se muestran diferentes fuentes de contaminación.
Fuente:
<<http://www.iac.es>>



La contaminación puede provenir de la suma de los siguientes factores:

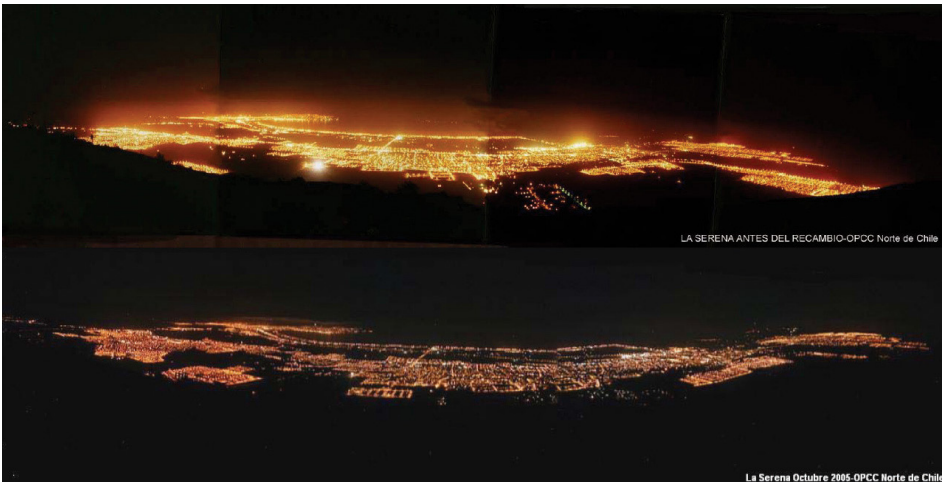
- *Emisión directa desde las fuentes de luz.* Es la emisión de luz hacia el entorno oscuro. Puede ser hacia el cielo o hacia un hábitat de seres vivos. Es la causa más importante de contaminación, debido a la intensidad de la fuente contaminante:

Ejemplos de iluminación directa hacia el cielo y hacia un hábitat natural oscuro (lechuza).
Fuentes:
<<http://www.flicker.com>>
y <<http://www.elmundo.com>>



- *Reflexión en las superficies iluminadas.* Otra causa de la CL es la reflexión sobre las superficies iluminadas. Calles, monumentos... La reflexión es inevitable si queremos conservar el alumbrado, pero *minimizarse* si se están utilizando niveles lumínicos superiores a los necesarios.

La Serena, Chile. Aspecto de la ciudad antes y después de la reforma total del alumbrado público. En la segunda imagen, se puede observar la CL sólo con la influencia de la reflexión sobre el pavimento de las calles. Fuente: OPCC Norte de Chile



- *Refracción de la luz en las partículas del aire.* Es la causa que tiene una afectación más leve y su caracterización está en estudio actualmente. Se trata de una variación del factor anterior, pero la luz, en lugar de reflejarse en una superficie sólida, se refleja en los átomos y en las partículas de la atmósfera.

La energía lumínica del alumbrado artificial es la causa de la contaminación. Mientras esté funcionando durante la noche, la CL será *inevitable* y, por tanto, no se podrá eliminar. Pero sí se pueden *minimizar* considerablemente sus repercusiones, eliminando el primer factor y minimizando los dos últimos.



1.3. Efectos de la CL

En los inicios del estudio de la CL, era relativamente frecuente encontrarse con la pregunta:

¿Efectos perjudiciales? ¿Cómo va a perjudicar la luz?

Partía del supuesto cultural de que “la luz siempre es buena”, que olvidaba que la presencia de luz impide la oscuridad y que, si bien en muchas situaciones la luz es conveniente, en muchas otras lo es la oscuridad. Por otra parte, aunque no es cierto que “la luz sea siempre buena”, sí lo es que “la luz siempre es cara”, por lo que su uso innecesario comporta un cierto grado de derroche.

Generalmente, la descripción de los efectos derivados de la carencia de oscuridad se asocia al ámbito donde tiene lugar:

- Sobre el *cielo nocturno*
- Sobre el *hábitat humano*
- Sobre los *espacios naturales*

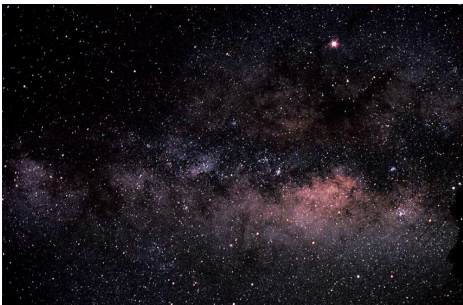
Y los derivados de los costes de la luz, como el *efecto socioeconómico de la CL*.

Por otra parte, a medida que la magnitud del fenómeno se incrementa, comienzan a detectarse *otros efectos no visuales de la CL*.

Es importante señalar que, salvo en el campo de la astronomía, precursor en los años setenta de los primeros estudios, las demás investigaciones han comenzado en años muy recientes. Se trata, por tanto, de investigaciones en fase de plena ebullición, en las que los nuevos enfoques y planteamientos están a la orden del día. Por ello, se ha considerado interesante incluir en este libro, aparte de la descripción básica de este capítulo, un apéndice específicamente destinado a los mencionados procesos de investigación, en el que se puedan apreciar mejor los matices y los campos en estudio.

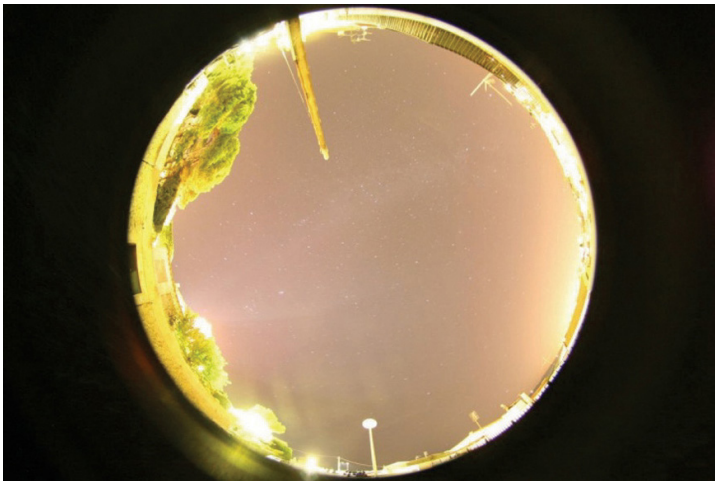
El efecto de la CL en el cielo nocturno

Vemos los astros por contraste: su brillo destaca, durante la noche, sobre la oscuridad celeste. Durante el día, cuando la luz del Sol aclara el cielo, no podemos verlos pese a que siguen estando ahí.





La dispersión de la luz nocturna en la atmósfera induce, como es lógico, un aumento de la claridad del fondo celeste que supera el brillo de las estrellas de menor magnitud e impide su visión, según puede apreciarse en varias de las imágenes precedentes, incluidas en este capítulo. A medida que la claridad del fondo de cielo aumenta, el número de estrellas visibles va disminuyendo e incluso, en algunas zonas intensamente iluminadas, llega a desaparecer por completo.



Los observatorios astronómicos comenzaron a advertir esta interferencia de la luz artificial, pues si bien al principio representaba sólo una merma en la calidad de sus observaciones, al irse incrementando se convirtió en una amenaza para la viabilidad de los observatorios situados en zonas de una cierta densidad de población. La magnitud utilizada en astronomía para cuantificar la CL es, precisamente, la *luminancia del fondo celeste*, que mide dicho incremento de claridad. En 1970, Walker comenzó a desarrollar modelos matemáticos para el estudio de posibles localizaciones, pero la problemática de CL ha obligado, en definitiva, a implantar los observatorios de primera categoría en zonas muy alejadas de los núcleos de población, lo cual ha encarecido su construcción y funcionamiento.

Los observatorios próximos a zonas de iluminación intensa, ya sea por su implantación inicial o por la necesidad de estar próximos a universidades u otros centros, así como los que se dedican a la astronomía amateur, ven muy limitadas sus posibilidades de observación. La CL constituye, pues, una limitación que dificulta y encarece el desarrollo de la ciencia astronómica, lo cual repercute en facetas del conocimiento y la innovación muy importantes para nuestra sociedad.

Además de la importancia de la aportación científica de la astronomía, al considerar este aspecto de la CL no debe olvidarse la importancia cultural de la *visión del cielo estrellado* en la historia de la humanidad. Para el hombre, ha sido la *ventana al infinito*, morada de dioses, guía de navegantes y caravanas, fuente de poesía y belleza.... La iniciativa StarLight, patrocinada por la UNESCO < <http://www.starlight2007.net> >, incide en esta perspectiva de valoración y conservación de un patrimonio cultural común a toda la humanidad.



Efectos de la CL en el hábitat humano

Ya hemos mencionado que, en la actualidad, es habitual la incidencia de la iluminación exterior en el interior de los domicilios. Ello representa, como mínimo, *una intrusión en la privacidad del ser humano*.

Esta intrusión puede sernos indiferente en muchos casos, incluso ventajosa al facilitarnos el desplazamiento nocturno, pero también es cierto que, en muchos otros casos, nos impide la posibilidad de desplegar el *ambiente de intimidad* que podemos desear para ciertas situaciones de mayor recogimiento personal (escuchar música, descansar, meditar...).

Si, además, esta *luz intrusa* incide en un espacio destinado básicamente al descanso, como por ejemplo un dormitorio, que requiere condiciones de aislamiento y oscuridad, interferirá en él dificultando el sueño o alterando los ritmos naturales de las personas. Los estudios actuales en *cronobiología* demuestran cómo, progresivamente, estas alteraciones del ritmo natural de la luz inciden sobre la salud humana.

La luz intrusa no sólo nos afecta en espacios interiores: también en jardines, terrazas, paseos al aire libre... Nuestro *paisaje nocturno* está amenazado. Ciertos tipos de imágenes son cada vez menos frecuentes.



La experiencia de la noche en zonas afectadas por la CL pierde el potencial encanto de la penumbra y la oscuridad. En definitiva: se empobrece.

Efectos de la CL en los espacios naturales

A partir del período Cámbrico, hace 500 millones de años, la luz y su ritmo de alternancia con la oscuridad han permanecido prácticamente constantes en el planeta Tierra. Estas condiciones son las que han gobernado la evolución de la vida y, por tanto, la adaptación metabólica de los organismos.



La CL en espacios naturales genera un cambio en estas condiciones asimiladas ancestralmente ante el cual el organismo ha de responder mediante una conducta que compense los efectos de dicha alteración. En principio, esta conducta puede implicar *atracción o rechazo*. En cualquiera de los dos casos, impulsa un *desplazamiento de la población* y, por tanto, afecta las condiciones de:

- *alimentación*, no sólo de la propia especie, sino también de las relacionadas directamente en la *cadena trófica*.
- *reproducción*; por ejemplo, en el caso de las tortugas marinas, una pequeña luz hace que las crías se pierdan camino del mar y no lleguen a poder desarrollarse como adultas.
- *relación depredador-presa*, como en el caso de los búhos, que detectan a sus presas gracias a la radiación infrarroja de sus cuerpos y, ocultos en la oscuridad, las cazan sin ser vistos.

Estos cambios en las condiciones afectan el *equilibrio ecológico*, más acusadamente en las especies de *ciclo nocturno activo*, que son la mayoría dentro del reino animal.

Así empezaron a detectarse, a medida que crecía la intrusión de la CL en los espacios naturales, problemas de *reducción* e, incluso, de *extinción de especies*. En un primer momento, los problemas se detectaron en poblaciones de insectos; más tarde, en aves migratorias que padecían problemas de orientación, y estas afectaciones se fueron incrementando –en paralelo con el incremento de la CL– a los anfibios, los mamíferos, las especies marinas y, también, los vegetales.

En el apéndice, se proporciona una descripción más completa y detallada del fenómeno, de la cual puede deducirse la magnitud actual del problema. Baste decir que la preocupación de la biología por estos temas ha motivado el desarrollo de dos nuevas ramas de estudio específicas: la *escotobiología*, que estudia la relación entre la vida y la oscuridad, y la *cronobiología*, que ya hemos citado más arriba.

Efectos socioeconómicos de la CL

Pueden clasificarse en:

a) Energético

Ya hemos visto, al final del apartado 1.1, que toda la luz contaminante implica, en su producción, un consumo suplementario de energía que supone un incremento del orden del 20% de la que sería necesaria para evitar la CL.

Como todos los fenómenos de consumo energético, éste ocasiona:

- Un incremento de los costes energéticos de producción y distribución.
- El consumo y la disponibilidad de los recursos naturales necesarios.
- Contaminación y residuos derivados del proceso productivo.



b) Cultural

La pérdida de la “experiencia de la noche” y, particularmente, de la “visión del cielo estrellado, priva a la humanidad de unos referentes básicos, que han sido de gran importancia en la gestación y la evolución de nuestra cultura, desde los signos del Zodíaco hasta los cuadros nocturnos de Van Gogh, pasando por la orientación de la navegación nocturna.



Como reflejo de esta problemática, puede citarse la imagen del cielo nocturno transformada por los niños de una gran población en un manto claro y amarillento.

Un sector que comienza a acusar esta problemática es el *turismo*, sobre todo el turismo de la naturaleza: varios operadores turísticos internacionales están implicados en la iniciativa StarLight, y cada vez son más las ofertas turísticas que valoran los emplazamientos en función de la calidad de su cielo nocturno.

Efectos no visuales de la CL

La función visual es tan importante para los seres humanos que tendemos a considerar la luz únicamente en sus aspectos ópticos y olvidamos que es, además, un importante *activador de reacciones químicas*.

Por ejemplo, los vegetales, cuyo metabolismo se basa en la *función clorofílica*, activada por la luz, se ven afectados por la inhabitual iluminación nocturna, que los debilita y adelgaza.

Otro fenómeno del mismo tipo se produce en ciertos gases atmosféricos, que en algunos lugares varían la composición de los elementos contaminantes. Durante la noche, los radicales NOx contaminantes de la atmósfera se deshacen en ausencia de luz. Al no existir esta ausencia total de luz, se estima que, en las ciudades, la CL produce un *efecto sinérgico en la contaminación atmosférica* que puede aumentar su composición entre el 5 y el 7%. Este aspecto es totalmente nuevo y actualmente es objeto de estudio.

→ 2



Análisis del foco contaminante. El alumbrado artificial

En este apartado se analizan las generalidades, las características y las tipologías más importantes del alumbrado artificial. Su objetivo no es ser un manual de iluminación o alumbrado, sino determinar los factores que inciden más en la CL y proporcionar las bases para plantear alternativas que permitan minimizar sus repercusiones.¹

2.1. El alumbrado artificial. Generalidades

La humanidad, desde sus inicios hasta bien entrado el período de la Ilustración, ha dependido básicamente de los recursos naturales. Por ello, su actividad se desarrollaba, generalmente, en espacios exteriores y durante las horas diurnas, en que se podía contar con el auxilio de la luz natural. Las actividades interiores o nocturnas eran residuales y, en consecuencia, las necesidades de utilización del alumbrado artificial eran muy escasas.

Al generalizarse la utilización de la fuerza del vapor y otros tipos de mecanismos, este panorama experimentó un cambio muy radical. Los trabajos pasaron a realizarse, cada vez más, en locales interiores, y las jornadas laborales se prolongaron hasta las horas nocturnas, para reducir el período de amortización de las inversiones de capital.

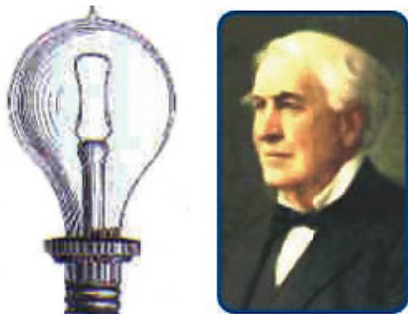
Esta nueva situación comportó la necesidad de utilizar *alumbrado artificial* para suplir la carencia de luz solar. Así, en el siglo XIX se asistió a un rápido desarrollo de nuevos tipos de iluminación: petróleo, acetileno, gas del alumbrado, arco voltaico..., que culminó en 1879 con las primeras aplicaciones prácticas de la lámpara eléctrica de incandescencia o “bombilla”.

El desarrollo de la iluminación artificial no fue, por razones tanto técnicas y económicas como culturales, tan fácil como hoy pudiera parecer. De hecho, durante la primera mitad del siglo XX, en muchos lugares la iluminación no existía o era

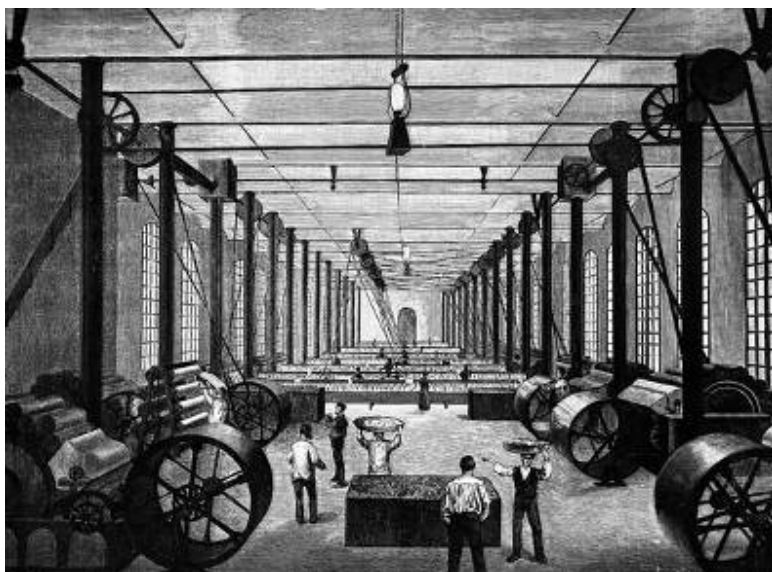


de muy baja intensidad. No sería hasta la década de 1940 que la iluminación artificial alcanzó unas características y una calidad comparables –aunque todavía inferiores– a las habituales hoy en día.

Lámpara
incandescente de
Thomas A. Edison



Fábrica de los primeros
años del siglo xx
(Fuente: <<http://www.kalipedia.com>>)



Así, el alumbrado artificial es un símbolo de desarrollo en ciertas regiones; incluso algunos estudios toman como referencia² la cantidad de luz vista desde el espacio en de determinadas zonas. Por tanto, se trata de un recurso del cual se nutre el ser humano para desarrollar su actividad cuando no existe la luz del Sol.

Función

La función del alumbrado es producir una energía lumínica que proporcione la suficiente información para que el ser humano pueda realizar una actividad determinada, en garantías de rendimiento, calidad, seguridad y satisfacción.

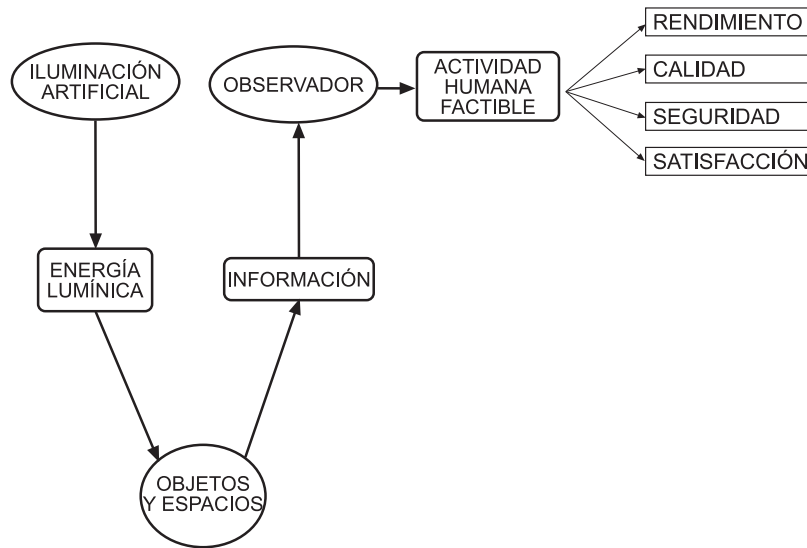


Diagrama de funciones generales del alumbrado
Fuente: Estudios Luminotécnicos de la UPC

La calidad y la cantidad de las garantías son regidas por la reglamentación y la normativa vigente. El alumbrado exterior nocturno tiene la función principal de ampliar a la noche las actividades que se realiza durante el día, gracias al alumbrado artificial. Entre otras:

- Conducción de vehículos
- Tránsito de peatones
- Realización de una actividad laboral
- Actividades de ocio y de reunión
- Estética y representación
- ...

Implicaciones en su uso

Cuando utilizamos luz artificial en un “espacio compartido”, es frecuente que podamos producir molestias a las personas que nos acompañan: leer en la cama sin molestar a la pareja, entrar en casa cuando los demás ya duermen... Raramente, la luz se concentra en un espacio delimitado: tiende a difundirse en el espacio, ya sea porque su haz es disperso o porque, al reflejarse en las superficies que ilumina, cambia de dirección e invade zonas en las que no es necesaria o no es deseada.

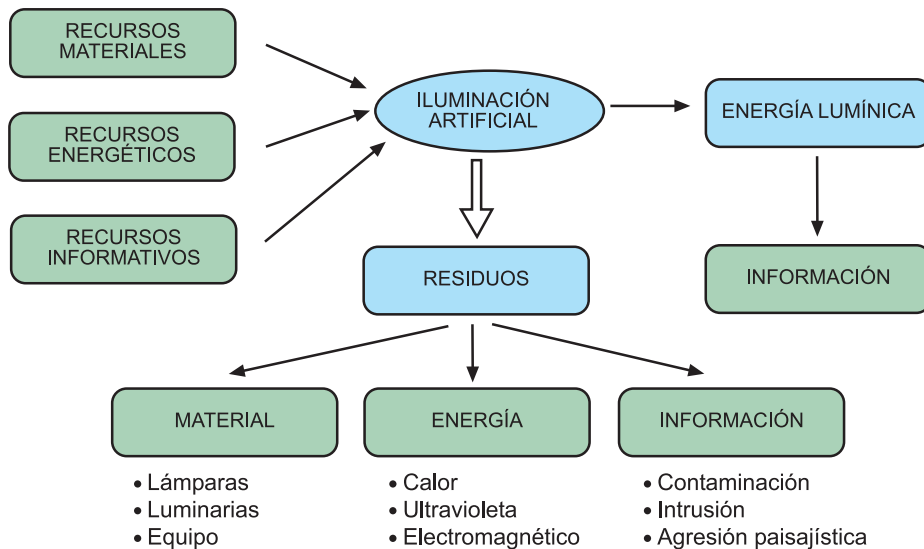
Si este fenómeno se da en zonas interiores, con mayor motivo se producirá en espacios exteriores, que son, por definición, zonas de uso plural, generalmente de “uso público”. Mientras la aplicación del alumbrado artificial exterior era limitada y los niveles de iluminación que se utilizaban eran discretos, esta problemática era muy reducida o casi inapreciable. A medida que su uso se ha ido extendiendo y prolongando, los niveles de iluminación también han ido aumentando. A la iluminación de los espacios se suman las decoraciones, los rótulos, la publicidad, la iluminación festiva... La luz ha desbordado sus propios límites y



ha invadido los terrenos próximos, las nubes, las ventanas de los dormitorios..., e incluso ha llegado a ser un espectáculo hermoso para las cámaras que nos contemplan desde el espacio, pero inútil y caro.

El alumbrado artificial tiene la función de proporcionar una información visual al ojo humano mediante una energía lumínica generada por medios humanos, no naturales. Esta función básica (que puede subdividirse en otras muchas) necesita toda una serie de recursos y genera residuos que hay que considerar:

Diagrama de repercusiones medioambientales del alumbrado
Fuente: Estudios Luminotècnics de la UPC



Algunos de los residuos que generan en su uso son materiales (los equipos necesarios para su funcionamiento), energéticos (las radiaciones no visibles, como el calor) e informativos (donde se incluiría la CL).

2.2. Condiciones lumínicas

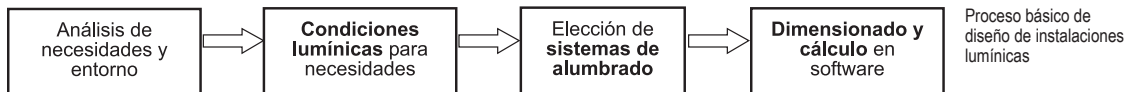
En la implantación e instalación del alumbrado artificial, se sigue un proceso de *diseño de instalaciones lumínicas*. De forma breve, podemos citar las siguientes fases:

- *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. También es preciso analizar si el entorno es sensible a la luz o bien si existe alguno próximo que establezca limitaciones al proyecto a realizar. La normativa y la reglamentación definen cuatro categorías de sensibilidad de un entorno (v. apartado 3.1).
- *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.* Cálculo 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.



En este apartado, se hace referencia a las *condiciones lumínicas*. Su determinación es esencial para el resultado final de la instalación y, por tanto, para el grado de CL final.

Cantidad de luz

Viene representada 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/m².
- **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/m².

El proyectista consciente 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.

El nivel lumínico es una magnitud aditiva. Es decir, en una instalación, si se dobla teóricamente la potencia instalada y, por tanto, se dobla el flujo lumínico saliente de las fuentes de luz, también se dobla el nivel lumínico: *augmentar en un X% la potencia aumenta en un X% el nivel lumínico.*



Calidad de la luz

La visibilidad que proporciona la instalación de alumbrado no depende únicamente de la magnitud del nivel de iluminación; los aspectos cualitativos son tan importantes o más que los cuantitativos.

Un nivel lumínico que normalmente resultaría adecuado puede ser insuficiente si la uniformidad de iluminación es reducida o si el deslumbramiento que ocasiona es elevado.

- **Uniformidad (U)**. Relación entre niveles lumínicos en una superficie determinada. Por ejemplo, la uniformidad media (U_m) es la relación entre el nivel lumínico mínimo y el medio.
- **Deslumbramiento (TI)**. Fenómeno que perturba la visión de los objetos sin causar necesariamente una sensación desagradable. La medición de la pérdida de visibilidad ocasionada por las luminarias de la instalación de alumbrado público se efectúa mediante el incremento del umbral de contraste. Existen diferentes formas de evaluarlo. Para el alumbrado vial, se utiliza el incremento umbral: TI (en %)

Otro factor para determinar la calidad de la luz necesaria es mediante el *color de la luz*. Esta condición viene determinada por la forma de emitir la energía lumínica por parte de las fuentes de luz. Se puede valorar mediante tres factores:

- **El tono**, para referirse al color básico de la luz resultante: blanco, rojo, azul... Nos ayuda a saber la emisión espectral de la lámpara.
- **El índice de reproducción cromática (IRC o Ra)**, que indica la capacidad de la luz para reproducir con fidelidad el color de los objetos. Se valora de 0 a 100, en orden de creciente calidad de reproducción. Se establece la siguiente clasificación de las lámparas según su reproducción cromática:

Clase	IRC	Consideración de los lugares donde sea necesario reconocer los colores (como en interiores o zonas comerciales)
1A 1B	≥ 90 80÷89	Excelente Muy buena
2A 2B	70÷79 60÷69	Buena Aceptable
3	40÷59	Regular
4	20÷39	Insuficiente
-	< 20	Nula



La reproducción cromática se refiere al aspecto del color que presentan las superficies iluminadas. Su calidad reproductora no sólo depende de la tonalidad de la luz incidente, sino fundamentalmente de su composición espectral.

Es especialmente importante *determinar la necesidad de IRC* para conocer la tipología de fuente de luz a utilizar. Como veremos más adelante, una elección inadecuada puede aumentar la repercusión de la CL de forma considerable.

- **La temperatura de color** relaciona la luz emitida por la fuente con la emitida por un “cuerpo negro” a la misma temperatura. Se expresa en grados Kelvin [K], es decir, la temperatura absoluta del cuerpo negro que emitiría una luz de la misma apariencia.

En realidad, la temperatura de color sólo tiene sentido en zonas de color cercanas al blanco, e indica (ya que éste es un color compuesto) si las proporciones de rojo o de azul en la mezcla son más o menos importantes. La temperatura de color se relaciona con la “apariciencia psicológica” ligada a la percepción de la luz. Se distingue entre luces cálidas, intermedias/ neutras o frías.



Ejemplos de temperatura de color
Fuente: Wikipedia

- 1700K: Luz de una cerilla
- 1850K: Luz de vela
- 2800K: Luz incandescente o de tungsteno (iluminación doméstica convencional)
- 5500K: Luz de día, flash electrónico (aproximado)
- 5770K: Temperatura de color de la luz del sol pura
- 6420K: Lámpara de Xenon
- 9300 K: Pantalla de televisión convencional
- 28000 - 30000 K: Relámpago

El proyectista, al establecer las condiciones lumínicas, ha de tener en cuenta simultáneamente todos los aspectos, y ser consciente de que la reducción del grado de deslumbramiento y la mejora de las condiciones de uniformidad le permitirán reducir el nivel sin afectar la visibilidad (siempre y cuando alcance los mínimos reglamentarios). Cualquier reducción de nivel implica una reducción proporcional de:

- el consumo energético
- la CL

Además, cabe mencionar que la visión humana trabaja por contraste (o por comparación). Así, una instalación de nivel elevado puede influir en las necesidades de iluminación de las zonas próximas. Por este motivo, es conveniente –especialmente en las zonas urbanas– intentar establecer una normativa general de iluminación que pueda generar unas condiciones de equilibrio entre distintas zonas urbanas y evitar que los niveles excesivos en una vía redunden, por “efecto dominó”, en la necesidad de incrementar también los de las vías próximas: Ordenanza municipal, Plan Director de Alumbrado Público ...



2.3. Sistemas lumínicos de alumbrado artificial

El *alumbrado artificial* es el conjunto de artefactos que sirven para generar energía lumínica y crear unas *condiciones determinadas de iluminación*. Estos “artefactos” se denominan *sistemas lumínicos* y pueden ser:

- *Fuentes de luz* (o lámparas). Transformadores de energía 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.

En este apartado, vamos a analizar los dos primeros. El último se analizará en el apartado 2.5.

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.

La lámpara debería mantener el valor del flujo luminoso al 100% continuamente, aunque en la práctica ello no es posible, ya que fenómenos físicos y tecnológicos provocan una *depreciación de la salida de flujo lumínico* a lo largo de su vida.

- **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 nm (en el eje X).

Ejemplos de espectros de emisión de tres tipos de fuentes de luz: lámpara de vapor de mercurio, lámpara incandescente y luz del Sol, respectivamente





Algunas lámparas (en general, las que se basan en emisión térmica) presentan un espectro continuo, es decir, emiten luz en todas las frecuencias del espectro visible; muchas otras presentan un espectro discontinuo, ya que sólo emiten radiación en determinadas frecuencias, lo cual no impide que, si están suficientemente equilibradas, la luz resultante sea blanca.

Para que las lámparas, como transformadoras de energía, pudieran trabajar con un 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.

- **Eficacia luminosa.** Es la relación entre el flujo emitido por la lámpara y la potencia eléctrica que necesita para hacerlo. La unidad es lm/W.

$$\text{Eficacia} = \frac{\text{Flujo emitido por la lámpara [lm]}}{\text{Potencia eléctrica consumida por la lámpara [W]}}$$

El máximo rendimiento luminoso que se puede conseguir en el caso más favorable (máximo teórico) es de 683 lm/W. Hoy en día se han conseguido lámparas con un rendimiento bastante alto, que permiten obtener iluminaciones elevadas de forma relativamente económica.

No obstante, en muchos casos hay que decidir cuál es la propiedad de la lámpara que resulta más valiosa: si un elevado rendimiento luminoso o una reproducción cromática extraordinariamente buena.

En el alumbrado exterior, un valor aceptable es 65 lm/W, aunque es altamente recomendable superar los 90 lm/W.

- **Vida de las lámparas.** Define su tiempo de utilización, en horas.
 - **Vida media.** Concepto estadístico que representa la mediana de la duración en horas de cada una de las lámparas de un grupo suficientemente representativo del mismo modelo y tipo. Es el período correspondiente a la mortandad del 50% de las lámparas de un lote representativo del mismo modelo y tipo.
 - **Vida útil.** Número de horas al cabo de las cuales el flujo lumínico de una determinada instalación de alumbrado ha descendido a un valor tal que la lámpara ya no es rentable, aunque esté en condiciones de seguir funcionando. Suele equivaler a un descenso del 70% del flujo inicial.



Tipología de lámparas

En el presente apartado, se resumen las características más importantes de las principales familias de lámparas del mercado. No se exponen datos comerciales concretos, valores exactos ni vinculados a su funcionalidad y repercusiones, aunque sí es una guía de las tendencias y los valores más representativos de cada una de ellas. Así pues, estos valores (eficacia, emisión espectral...) deben considerarse orientativos, y no valores taxativos.

Las familias de lámparas descritas son:

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

Para cada una de ellas, se indica si existen tecnologías o utilizaciones específicas que puedan incidir en la problemática de la CL, especialmente las relacionadas con el espectro de emisión.

No se exponen las lámparas incandescentes o halógenas, puesto que su uso es marginal o inexistente en alumbrado exterior.

Vapor de sodio

Las lámparas de vapor de sodio son lámparas de descarga que se utilizan, principalmente, para la iluminación exterior. La tonalidad de su luz es amarillenta y sus características más importantes son:

- Baja reproducción cromática
- Alta eficacia energética
- Baja afectación medioambiental por su baja componente de radiación, inferior a 440 nm

Se conocen dos grandes familias, según la presión del gas en el interior del tubo de descarga: *vapor de sodio a alta presión* y *vapor de sodio a baja presión*.

Su uso es indicado, en general, en las zonas de exterior. Solamente no es recomendada –especialmente la de sodio de baja presión– en aquellos lugares donde el rendimiento cromático sea un requisito de diseño predominante por la actividad que se realice. Por ejemplo en calles, autopistas, avenidas, polígonos industriales...



VAPOR DE SODIO A ALTA PRESIÓN	
Datos energéticos	
Intervalo de potencias nominales	50-1.000 W
Eficacia típica	100 lm/W
Características de color	
Tono	Amarillo dorado (más agradable que VSBP)
IRC	25
Temperatura de color (K)	2.300 K
Espectro de emisiones	<p>Discontinuo</p>
Ciclo de operación	
Regulación	Sí.
Tiempo de encendido	No inmediato. Entre 4 y 6 minutos.
Tiempo de reencendido	No inmediato. Entre 5 y 15 minutos.

VAPOR DE SODIO A BAJA PRESIÓN	
Datos energéticos	
Intervalo de potencias nominales	18-180 W
Eficacia típica	180 lm/W
Características de color	
Tono	Amarillo anaranjado
IRC	0
Temperatura de color (K)	2.000 K
Espectro de emisiones	<p>Discontinuo</p>
Ciclo de operación	
Regulación	Sí.
Tiempo de encendido	No inmediato. Entre 7 y 12 minutos.
Tiempo de reencendido	No inmediato. Entre 3 y 7 minutos.



Lámparas de vapor de sodio.



Lámparas de halogenuros metálicos.





Halogenuros metálicos

Las lámparas de halogenuros metálicos son lámparas de descarga a alta intensidad. La tonalidad de la luz es blanca brillante y de alta calidad. Sus características más importantes son:

- Alta reproducción cromática
- Buena eficacia lumínica

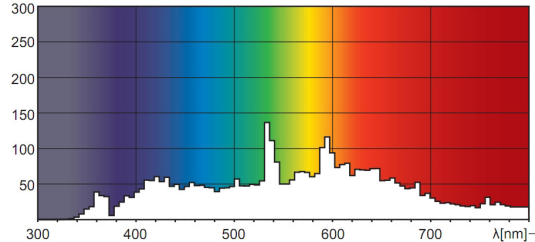
A pesar de ello, las que presentan las mejores características tienen emisión por debajo de los 440 nm, y su precio y vida útil suelen encarecer el coste de mantenimiento de las instalaciones.

Se conocen dos grandes familias, según la construcción del quemador: *de cuarzo* o *cerámicos*. En el alumbrado vial, que exige vidas útiles importantes, la tendencia creciente es el uso de la tecnología cerámica.

Su uso es indicado en aquellos lugares donde se quiere tener una iluminación de alta reproducción cromática para actividades de ocio y comerciales muy específicas, siempre y cuando estén en zonas urbanas alejadas de zonas de alta sensibilidad a la CL.

Se utilizan con frecuencia en iluminaciones deportivas, fachadas, zonas de alta representación o comerciales...

Actualmente, se están desarrollando modelos de potencias muy reducidas.

HALOGENUROS METÁLICOS	
Datos energéticos	
Intervalo de potencias nominales	20-2.000 W
Eficacia típica	90 lm/W
Características de color	
Tono	Blanco
IRC	60-90
Temperatura de color (K)	2.800 K-5.000 K
Espectro de emisiones	Discontinuo. Ejemplo de quemador cerámico frío 
Ciclo de operación	
Regulación	Según el fabricante, la lámpara y el equipo auxiliar.
Tiempo de encendido	No inmediato. Entre 3 y 5 minutos.
Tiempo de reencendido	No inmediato. Entre 4 y 15 minutos.

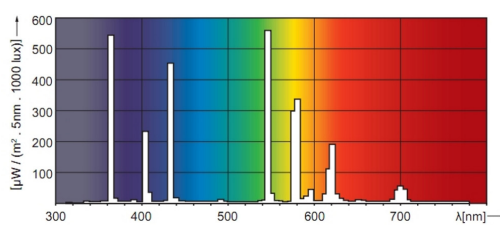


Vapor de mercurio

Ha sido la lámpara utilizada de forma generalizada en el alumbrado público para conseguir luz blanca durante mucho tiempo. En la actualidad, está en extinción y, según sus características, es prohibida en diferentes países por su reducida eficacia. La tonalidad de la luz es blanca azulada. Sus características más importantes son:

- Reproducción cromática correcta
- Eficacia lumínica reducida
- Elevada emisión por debajo de los 440 nm

No se aconseja utilizarla y se recomienda sustituirla en las instalaciones existentes.

VAPOR DE MERCURIO	
Datos energéticos	
Intervalo de potencias nominales	50-2.000 W
Eficacia típica	50 lm/W
Características de color	
Tono	Blanco
IRC	40
Temperatura de color (K)	4.000 K
Espectro de emisiones	Discontinuo. 
Ciclo de operación	
Regulación	Sí.
Tiempo de encendido	No inmediato. Entre 4 y 5 minutos.
Tiempo de reencendido	No inmediato. Entre 5 y 10 minutos.



Fluorescencia

Es una lámpara a baja presión que emite radiación visible a través de la sustancia fosforescente que posee el recubrimiento exterior del tubo de descarga. Es de baja potencia, con gran tamaño del emisor.

Se presenta en múltiples familias: compactas (simples, dobles, triples), tubulares (T12, T8, T5, T2), circulares..., con características específicas dependiendo del uso a que se quiera destinar.

Sus características más importantes son:

- Elevada reproducción del color
- Alta eficacia luminosa
- En los tonos más fríos, tiene una emisión considerable por debajo de los 440 nm.

Se aconseja utilizarla en lugares donde sea necesario una elevada reproducción del color y bajos niveles de iluminación (que se pueden conseguir con una buena uniformidad en sus formatos de baja potencia). Puede usarse en algunos parques con luminarias de poca salida lumínica, en porches....

FLUORESCENCIA	
Datos energéticos	
Intervalo de potencias nominales	11 W-80 W
Eficacia típica	80 lm/W
Características de color	
Tono	Blanco
IRC	80
Temperatura de color (K)	2.700-5.000 K
Espectro de emisiones	<p>Discontinuo. Ejemplo a temperatura fría:</p> <p style="text-align: center;">Designación de color /840</p>
Ciclo de operación	
Regulación	Sí, con el equipo auxiliar adecuado.
Tiempo de encendido	Casi inmediato.
Tiempo de reencendido	Casi inmediato.



Inducción

Es una lámpara que funciona por el principio de la luminiscencia inducida a través de un campo electromagnético.

Existen diferentes familias, en función del fabricante y del diseño de luminarias, que ha de ser específico para la lámpara.

Sus características más importantes son:

- Vida útil muy elevada (60.000 horas)
- Alta reproducción del color
- Eficacia luminosa moderada, que roza los límites recomendables
- En los tonos más fríos, presenta una considerable emisión por debajo de los 440 nm.

Se aconseja utilizarla en lugares donde se requiera una alta reproducción del color y bajos niveles de iluminación (que se pueden conseguir con una buena uniformidad en sus formatos de baja potencia).

INDUCCIÓN	
Datos energéticos	
Intervalo de potencias nominales	50 W-165 W
Eficacia típica	60-70 lm/W
Características de color	
Tono	Blanco
IRC	80
Temperatura de color (K)	3.000-5.000 K
Espectro de emisiones	Discontinuo. Ejemplo a temperatura fría: 
Ciclo de operación	
Regulación	-
Tiempo de encendido	Casi inmediato.
Tiempo de reencendido	Casi inmediato.



LED

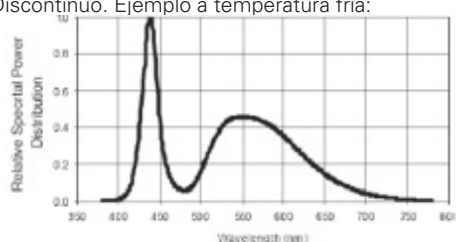
Es una lámpara cuyo principio de funcionamiento es la fotoluminiscencia. Emite radiación luminosa a través de la generación de energía en la unión de dos semiconductores p-n. Se utiliza desde hace tiempo en la señalización, mientras que su aplicación en la iluminación es relativamente nueva y está en desarrollo constante. Actualmente, se considera que comienza a llegar a la etapa de madurez, aunque todavía no la ha alcanzado.

Existen múltiples familias: de 3 mm, de 5 mm, de alta potencia, matriz de LED, OLED... Con características específicas dependiendo del uso que se quiera realizar.

Sus características más importantes son:

- Alto rendimiento del color para luz blanca
- Eficacia luminosa elevada (dependiendo de la tecnología específica utilizada)
- En los tonos más fríos, presenta una considerable emisión por debajo de los 440 nm.

Se aconseja utilizarla en lugares donde se requiera un alto rendimiento del color y bajos niveles de iluminación (que pueden conseguirse con una buena uniformidad en sus formatos de baja potencia).

LED	
Datos energéticos	
Intervalo de potencias nominales	Variable
Eficacia típica	10-90 lm/W
Características de color	
Tono	Multicolor
IRC	Hasta 90
Temperatura de color (K)	2.700-5.000 K o color
Espectro de emisiones	Discontinuo. Ejemplo a temperatura fría:  T=5500 K
Ciclo de operación	
Regulación	Sí, con el equipo adecuado.
Tiempo de encendido	Inmediato.
Tiempo de reencendido	Inmediato.



Luminarias

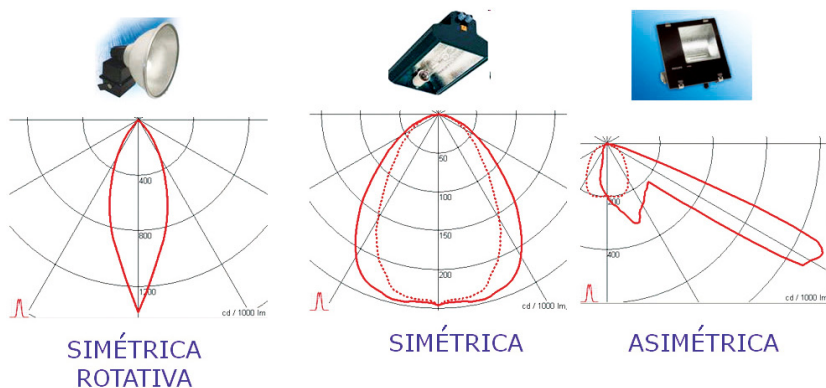
La luminaria es el elemento que aloja la fuente de luz y distribuye –mediante espejos, prismas, difusores...– la iluminación en distintas direcciones del espacio. Entre sus características más importantes destacan las siguientes.

- **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.

Muestras de diferentes fotometrías



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

- **Rendimiento (η).** 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.:

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Flujo lumínico emitido}}{\text{Flujo lámpara}}$$



- **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.

$$\text{Factor Utilización} = \frac{\text{Flujo lumínico en zona útil}}{\text{Flujo lámpara}}$$

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 único, y se expresa mediante gráficos o tablas.

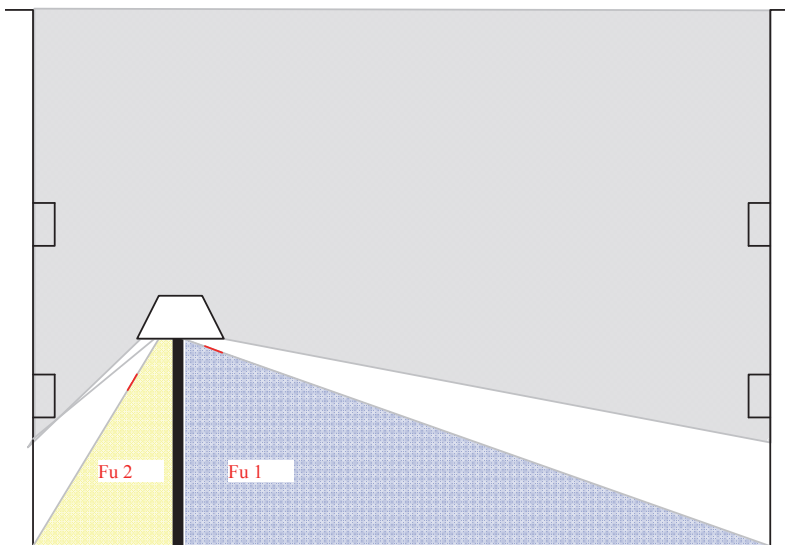
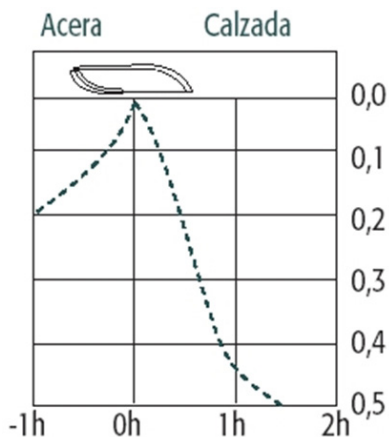


Diagrama de flujo lumínico que se utiliza para calcular el factor de utilización de la acera (Fu2) o de las calzadas (Fu1)



Esquema de distribución del factor de utilización hacia la calzada o acera
Fuente:
<<http://www.indal.es>>



– **Flujo Hemisférico Superior (FHS)**. 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)

$$FHS = \frac{\text{Flujo lumínico emitido}}{\text{Flujo lámpara}}$$

(Flujo Hemisférico Superior instalado)

$$FHSi = \frac{\text{Flujo sobre la horizontal}}{\text{Flujo luminaria}}$$

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 *FHS instalado*. Es importante no confundirse al examinar la documentación fotométrica de las luminarias. El *FHSi* es siempre mayor que el *FHS* ($FHSi = FHS/\text{rendimiento}$).

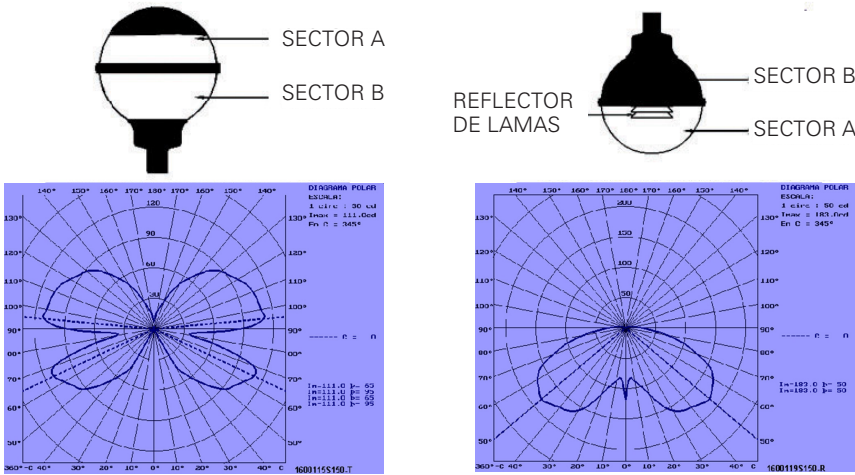
En la tabla siguiente, se exponen algunos modelos de luminaria y sus datos de distribución lumínica.

LUMINARIA	FHSi (%)	IMAGEN
Carandini STR 154-C	1	
Carandini QS-2	1	
Carandini SM-500	50	
Carandini S-250	32	

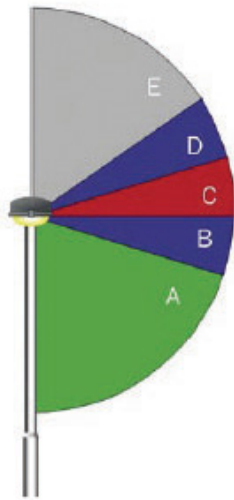
El *FHSi* se puede observar también en la fotometría de las luminarias. A continuación, pueden verse dos ejemplos. Uno de luminaria con $FHSi > 30\%$ y otro con un $FHSi < 1\%$. La intensidad lumínica que se emite por encima de la horizontal (también de la fotometría) es componente de *FHSi*:



Esquema de distribución fotométrica asociada al FHSi (en %)



En la actualidad, hay estudios en desarrollo que valoran el *FHSi* de la luminaria no sólo por su cantidad, sino también por su *dirección*. La salida de la intensidad luminosa en ángulos horizontales es potencialmente mucho más dañina que la salida totalmente vertical (que atraviesa menos atmósfera y escapa más fácilmente al espacio exterior).



Effect on Skyglow and cut-off angle

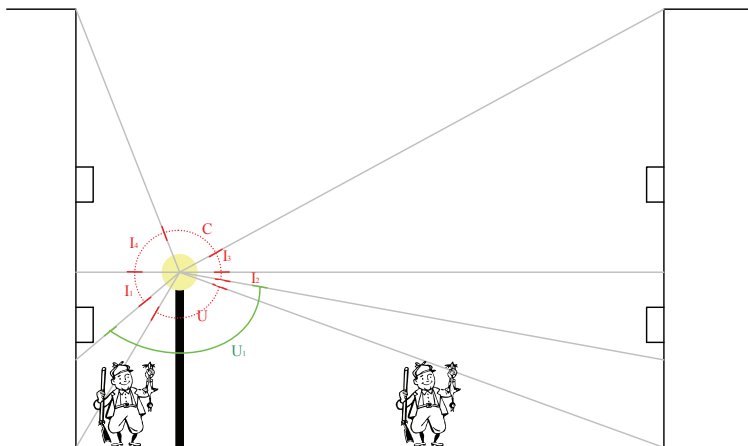
Diagram to show relative impact of a luminaire's output contribution to skyglow.

- E, 100-180 Critical area for skyglow experience from within urban and all areas but proportionally less impact to rural areas.
- D, 95-100 Significant contributor to skyglow, especially in rural areas where it is most aerosol dependent. Less likely to be obstructed.
- C, 90-95 Critical zone for skyglow and obstruction seen at 10s of km (in rural areas) where it is strongly dependent on aerosol scattering.
- B, 85-90 Significant contributor to skyglow seen at a distance through reflection but reflected light more likely to be obstructed by buildings, trees and topography.
- A, 0-85 Ideal light distribution.

Caracterización de la emisión contaminante según la salida de la intensidad luminosa
Fuente: Chris Baddiley, StarLight. A Common Heritage

Distribución lumínica en un caso real

En la siguiente figura, observemos un caso real de distribución de la luz y analicemos, mediante un esquema, la *distribución lumínica de una luminaria y lámpara*:



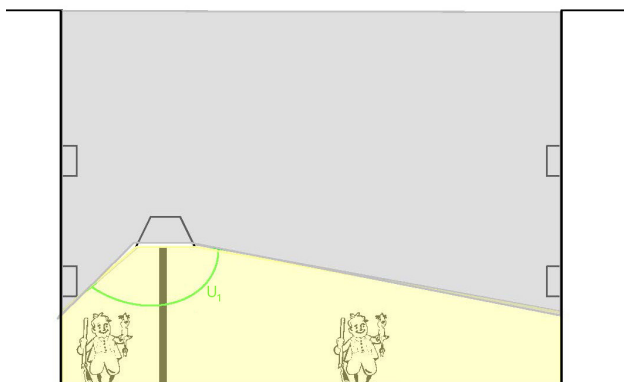
Para poder analizar el fenómeno completo, estudiemos la distribución que realizaría una luminaria esférica (de tipo esférico uniforme).

La línea horizontal que atraviesa la luminaria marca la separación entre el Flujo Hemisférico Superior instalado (*FHSi*, por encima del horizonte) y el Flujo Hemisférico Inferior instalado (*FHli*, por debajo del horizonte).

Del *FHI*, únicamente el flujo emitido dentro del ángulo U ilumina la calle. Es, por tanto, lo que debemos considerar *flujo útil*.³

El flujo restante (ángulos $I1$ e $I2$) 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 $I3$ e $I4$ 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*.





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*.

Del análisis de esta situación, pueden deducirse las dos reglas fundamentales del manejo de la distribución lumínica de la luminaria para reducir su incidencia en la CL:

- *El Flujo Hemisférico Superior produce únicamente efectos contaminantes: ha de anularse o reducirse al mínimo.*
- *El ángulo de emisión del Flujo Hemisférico Inferior ha de ajustarse al máximo a la zona que precisa iluminación (dentro de los ángulos U y U1). Ello equivale a incrementar lo máximo posible el valor del factor de utilización.*

El cumplimiento de la segunda regla depende del diseño lumínico del proyecto. Debe seleccionarse:

- el modelo de luminaria,
- el tipo de reflector y enfoque de lámpara,
- la disposición, la altura y la inclinación de la luminaria,

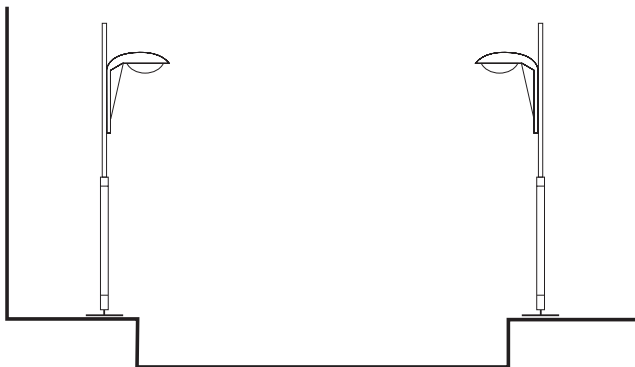
de forma que maximicen el mencionado valor del factor de utilización.

Tipología de luminarias

En el alumbrado exterior, podemos distinguir diversos tipos:

- *Luminaria vial*: Destinada, en principio, a la iluminación de calles y carreteras.





Dirige la luz preferentemente hacia su parte anterior y lateral, e intenta cubrir la vía longitudinalmente.

La mejor solución para obtener un FHSi reducido es colocar la lámpara horizontalmente y utilizar un cierre plano o de curvatura muy leve. Los cierres convexos, tipo cubeta, tienden a crear una difusión de luz, que crece con la rugosidad o el deterioro de la misma.

- **Luminaria ambiente:** destinada a la iluminación de plazas, jardines, áreas arquitectónicas, etc. Presenta modelos y diseños muy variados.

Muestra de luminaria ambiental.
Fuente:
<<http://www.dsgnwrld.com>>



Muchas de ellas dirigen una proporción relativamente importante de luz en direcciones por encima de la horizontal, especialmente las luminarias esféricas, que llegan a emitir en esa dirección prácticamente el 50% de la luz.

La tendencia actual es que el bloque óptico de las luminarias de ambiente adopte la forma prescrita para las luminarias de tipo vial, y que varíen la forma y las dimensiones del cuerpo exterior.



Luminaria ambiente de tipo esférico, contaminante (FHSi>50%) y no contaminante (FHSi<1%)

Si se adopta la forma más tradicional de luminaria de jardín, una cubierta superior amplia, y se instalan aros paralúmenes alrededor de la lámpara, puede reducirse favorablemente el FHSi todo y reducir también su rendimiento.



- **Proyectores:** dirigen la luz en una dirección preferente y dentro de un ángulo relativamente limitado.



Suelen utilizarse para la iluminación de fachadas, monumentos, áreas extensas, rótulos...Mientras las luminarias citadas en los grupos anteriores suelen tener una posición fija de funcionamiento, que sólo varía en algunos grados de inclinación, la posición de los proyectores es distinta en cada caso, pues se enfocan en direcciones concretas y variables según el objeto a iluminar. No tiene sentido, por tanto, hablar de un parámetro FHSi en este caso.



Las recomendaciones básicas para reducir la CL originada por un proyector son las siguientes:

- Evitar enfoques en que la dirección del haz de mayor intensidad supere los 70° con respecto a la vertical.
- Evitar el uso de proyectores de “haz amplio”.
- Utilizar rejillas o viseras paralumen que impidan la emisión del Flujo Hemisférico Superior.

Es muy recomendable utilizar proyectores asimétricos. En casos muy delicados, pueden utilizarse también proyectores dotados de lentes de enfoque –similares a los utilizados en teatro y espectáculos–, los cuales permiten recortar con precisión los ángulos de distribución lumínica.

Izquierda:
Proyector asimétrico



derecha

Fuente: <<http://www.iac.es>>



- *Otros tipos de luminarias.* Pueden ser muy variados:





2.4. Dimensionado y cálculo de iluminación

Como se ha comentado al inicio del capítulo B, este libro no pretende ser un manual de iluminación, por lo que en el desarrollo de este apartado no se describirá en detalle la metodología para su dimensionado y cálculo. Se enumerarán algunas pautas de guía y se proporcionarán referencias a enlaces exteriores para ampliar los conocimientos, si es preciso.

Para el dimensionado y el cálculo de instalaciones lumínicas, se suelen utilizar dos métodos tradicionales: el método de flujo y el método del punto a punto.

Método del flujo

Es un método de predimensionado que permite, mediante un fácil cálculo aritmético, determinar el nivel de iluminación medio de la superficie a calcular.

El método tiene algunas limitaciones:

- Sólo calcula un valor medio de la superficie (ni puntuales, ni uniformidades...).
- Sólo se puede utilizar en superficies muy simples (rectangulares).

Se realiza mediante el uso de la fórmula del nivel de iluminación:

$$E_{media} = \frac{\Phi_{útil}}{S}$$

$$E_{media} = \frac{\Phi_{LUMINARIA} \cdot unidades}{S} = \frac{\Phi_{LÁMPARA} \cdot Fm \cdot Fu \cdot unidades}{L \cdot a}$$

donde:

E_m : Nivel de iluminación medio en servicio de la instalación (es decir, considerando la depreciación en el tiempo).

$\Phi_{LÁMPARA}$: Flujo lumínico de la lámpara. Se conoce de los catálogos de los fabricantes.

F_m : Factor de mantenimiento de la instalación. Determina la depreciación de ésta.

F_u : Factor de utilización de la luminaria. Se puede conocer de los catálogos de los fabricantes (ya sea en tablas o gráficos).

L : Longitud de la superficie a iluminar.

a : Anchura de la superficie a iluminar.



Conociendo el nivel de iluminación necesario y el flujo lumínico de las lámparas que se quieren utilizar, podría también calcularse el número de luminarias necesario.

Para ver el método completo y ejemplos de uso, consúltese:
<<http://edison.upc.edu/curs/llum/exterio/calculos.html#mfacutil>>

Método del punto a punto

Se realiza un cálculo más exacto mediante el cálculo de los niveles de iluminación en varios puntos representativos. Para ello, se usan las fórmulas básicas de la luminotecnia.

$$E_i = \frac{I(C, \gamma)}{H^2} \cdot \cos^3 \gamma_i$$

donde:

E_i : Nivel de iluminación en un punto i .

$i(C, \gamma)$: Intensidad luminosa de una luminaria en dirección hacia el punto cuya iluminación se estudia.

H^2 : En esta fórmula es la altura de la luminaria.

Este método proporciona unos niveles de iluminación en varios puntos, por lo que permite tener valores de uniformidad y valores extremos lumínicos. Pero es un método largo y laborioso. Y cuantos más puntos de análisis, mayor exactitud en el cálculo, pero también más tiempo de procesamiento.

Para ver el método completo y ejemplos de su uso, consúltese:
<<http://edison.upc.edu/curs/llum/exterio/calculos.html#9ptos>>

Sin embargo, actualmente se usan, de forma generalizada, los *programas informáticos de cálculo*.

Programas informáticos

Se pueden considerar diferentes categorías de software, pero para la iluminación genérica y generalizada existen programas no asociados a un fabricante, que se pueden utilizar con los archivos de fotometrías de diferentes marcas. Algunos de ellos son DIALux <<http://www.dial.de>>, RELux <<http://www.relux.biz/>> o LITESTAR <<http://www.oxytech.it>>.

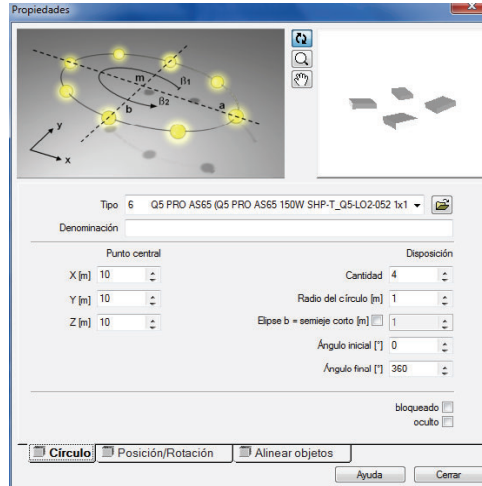
Sus funcionalidades y potencial son similares, y los tres se pueden descargar de forma gratuita, con una importante base de datos de fabricantes.

Su uso es muy similar en todos ellos y pueden aplicarse a proyectos luminotécnicos de interior, exterior, fachadas, viales...

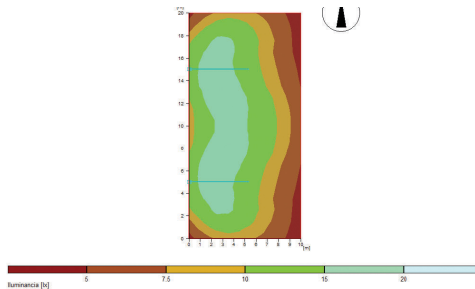
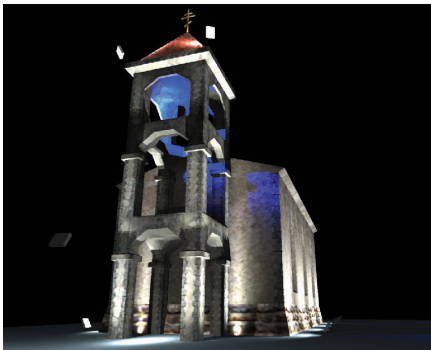


	Variante1
Perfil de la calle	Calle sin calzada central
Denominación	Calle
Anchura de la calle	10.00
Cantidad de calzadas	2
Revestimiento de la calzada	R3
q0	0.08
Tipo de luminaria	1 KAOS 1 (KAOS 1 70W SHP-T P3)
Fila de luminarias	desplazado en ambos lados
Distancia de las luminarias	30.00
Altura del punto lumínico	5.00
Voladizo	0.50
Inclinación	15.00
Orientación	0.00

E horizontal término medio	12,2
E horizontal mín.	7,7
E horizontal máx.	20,5
E horizontal Mín. /Término medio	0,63
E horizontal mín/máx	0,38
Aumento del valor umbral TI	10



Muestra de diferentes pantallas de visualización del software RELux
Fuente: elaboración propia



Como *metodología general*, los pasos a seguir son:

1. Modelizar un espacio a iluminar (calle, plaza, fachada...).
2. Hacer un predimensionado mediante métodos manuales (de cálculo, gráficos, por experiencia...).
3. Seleccionar la luminaria y las fuentes de luz (mediante un archivo fotométrico).
4. Preparar los datos de implantación de luminarias (número, posición, orientación...).
5. Realizar el cálculo.
6. Analizar los datos y verificar el cumplimiento de las condiciones lumínicas previamente determinadas. En caso de que no se cumplan, volver a los pasos 2 o 3.



2.5. Gestión del servicio lumínico en el tiempo

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. En el caso de exteriores se prevé la situación de máxima actividad prevista para la zona a iluminar.

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 consumo energético* al nivel imprescindible a la actividad que se quiera realizar.

Encendido y apagado

El uso del alumbrado se justifica en las necesidades visuales de una actividad determinada. Por ello, deben preverse elementos de encendido y apagado –manual o automático– capaces de sincronizar el funcionamiento de la iluminación con los períodos reales de desarrollo de la actividad.

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.

La optimización del funcionamiento genera un ahorro energético considerable.

Regulación: Adaptación de niveles lumínicos al uso

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.

La instalación de alumbrado debe diseñarse, pues, de forma que sea “regulable”, es decir: capaz de adaptarse a las necesidades lumínicas de cada uno de sus distintos períodos de uso.

Algunas de las tecnologías disponibles son:

- *Apagada alternativa*: Apagado de fuentes de luz no consecutivas (por ejemplo una si , una no), 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.
- *Regulación mediante los equipos auxiliares e 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.

Mantenimiento de las instalaciones

Las instalaciones de alumbrado exterior están sometidas a unas duras condiciones de funcionamiento, tanto por la acción de los agentes atmosféricos como por las condiciones de servicio y, también, por la posible incidencia de agentes exteriores (accidentes, vandalismo...).

Sus condiciones iniciales tenderán, pues, a depreciarse y a variar, por lo que es necesario prever una política de mantenimiento –reparaciones, revisiones, limpieza, ajustes...– que palie sus consecuencias. Desde el punto de vista de la protección del medio nocturno, es especialmente importante vigilar que se con-



serven las prestaciones y características iniciales, así como el posicionamiento, enfoque y ajuste de los elementos de la instalación.

2.6. Medidas para disminuir la CL

¿Cómo se podrían minimizar estas repercusiones o implicaciones? No se trata de reglas complejas o complicadas. El proyectista de la iluminación únicamente debe adquirir la costumbre de plantearse cuatro sencillas preguntas y darles respuesta en su concepción del alumbrado.

Estas preguntas son las siguientes:

- ¿Dónde se necesita la luz?
- ¿Cuánta luz se necesita?
- ¿Qué luz se necesita?
- ¿Cuándo se necesita?

A continuación, analizamos cada una de ellas.

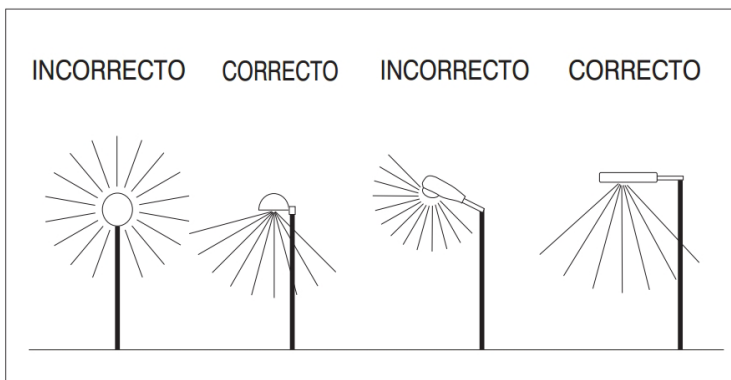
¿Dónde se necesita la luz?

La luz debe incidir *únicamente* en las zonas que ha de recorrer el observador y en los objetos que es necesario que sea capaz de ver.

Por ejemplo, en una calle, la luz ha de incidir en la calzada, en las aceras y en los peatones u otros vehículos que puedan interferir en su camino. Iluminar la parte alta de las fachadas o emitir luz hacia el cielo no ayuda en absoluto a la *visibilidad necesaria* y es un derroche que, además, puede producir molestias a los vecinos de la calle o perjudicar las condiciones naturales de la noche.

La regla es sencilla y nos conduce a elegir luminarias que limiten su emisión a las zonas citadas y a enfocarlas convenientemente.

No siempre es posible cumplir la regla a rajatabla. La distribución de la luz no puede “recortarse con unas tijeras”, sino que presenta una tendencia natural a dispersarse por reflejos, difracción o dispersión.

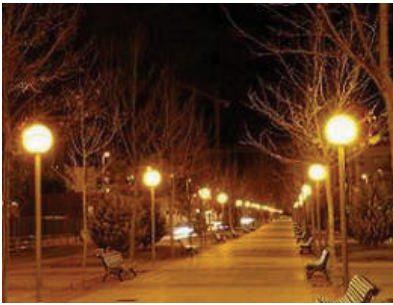




Por otra parte, en ocasiones, las *exigencias de visibilidad* comportan la necesidad de extender la iluminación más allá del área de uso. Por ejemplo: la iluminación de un campo de fútbol que se limitase estrictamente a sus límites dejaría en la oscuridad las porterías; lo mismo podría decirse de los peatones en las aceras y la iluminación de la fachada de las plantas bajas...

Pero estas limitaciones no deben justificar la despreocupación del proyectista. No siempre es posible limitar totalmente la dispersión de luz fuera de la zona a iluminar, *pero es fácil y conveniente reducir esta dispersión al mínimo.*

Para ello, hay que adecuar las necesidades lumínicas a unos FHSi mínimos (cerca al 1%) y a factores de utilización máximos (superiores al 0,4).



Otra consideración necesaria en lo que respecta a la zona iluminada es su *sensibilidad* a los perjuicios que pueda ocasionarle la intrusión lumínica. Una zona residencial, por ejemplo, es especialmente sensible a la *intrusión lumínica* en las ventanas de los edificios. En el caso de las *áreas de interés natural*, deben extremarse las precauciones para evitar que la CL pueda afectar la biodiversidad.

¿Cuánta luz se necesita?

Como ya se ha explicado en el apartado anterior, la visibilidad no depende de la *cantidad de luz*. Existen unos límites mínimos por debajo de los cuales resultaría imposible o muy comprometida una visibilidad adecuada; existen también unos factores de *confort* que, en ocasiones, pueden aconsejar superar estos límites mínimos... Todo ello ha servido de base a los estudios que han conducido a la especificación de reglamentos, recomendaciones, etc., sobre los niveles de iluminación necesarios para las distintas actividades.

Superar estos niveles recomendados supone:

- Incrementar proporcionalmente el consumo de energía de la instalación.
- Incrementar proporcionalmente la contaminación por luz reflejada o dispersa.

Y ello sin que las condiciones de *visibilidad o confort* mejoren sensiblemente. La influencia del nivel sobre la efectividad de la iluminación sigue siempre una *curva de rendimiento decreciente*.



Es decir, mientras a niveles bajos –por debajo de los mínimos– un ligero incremento de nivel representa un aumento importante de efectividad, a niveles superiores, incrementos muy importantes se reflejan en variaciones muy reducidas –generalmente insignificantes– de su efectividad.

El proyectista debe, por tanto, ajustarse a los niveles previstos para el tipo de zonas o actividades objeto de estudio. En todo caso, como se menciona en el apartado 2.2, no deben excederse nunca los niveles previstos en más de un 20%.

¿Qué luz se necesita?

La calidad de la luz es una condición lumínica que indica cómo ha de ser la iluminación. El diseñador de la luz ha de especificar las calidades de la luz. En el caso de la CL, ha de considerar la posibilidad de tener unas instalaciones con una gran uniformidad y bajo deslumbramiento, para poder obtener una visibilidad superior.

Con respecto al color de la luz, se ha de trabajar con fuentes de luz que tengan un espectro de emisión con baja emisión en las bandas cortas de longitud de onda. Las emisiones por debajo de los 500 nm tienen mayor incidencia sobre los seres vivos y la dispersión atmosférica.

La energía lumínica se dispersa en la atmósfera mediante la reflexión, la difracción o la absorción de la luz en las partículas que la luz se encuentra. En una atmósfera limpia, la dispersión es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda (dispersión de Rayleigh).

Esto es, se dispersa con mucha más facilidad la luz en la componente azul y violeta que no las amarillas o rojizas. Esa es la razón por la que el cielo es azul durante el día: se dispersa la componente azul de la luz proveniente del Sol.

Por tanto, la luz amarilla es menos contaminante que la blanca, que tiene mayor componente en el azul.

En atmósferas no limpias (contaminadas, nubes, nieblas...), la dispersión depende también de otros factores: se rige por la denominada dispersión de Mie.

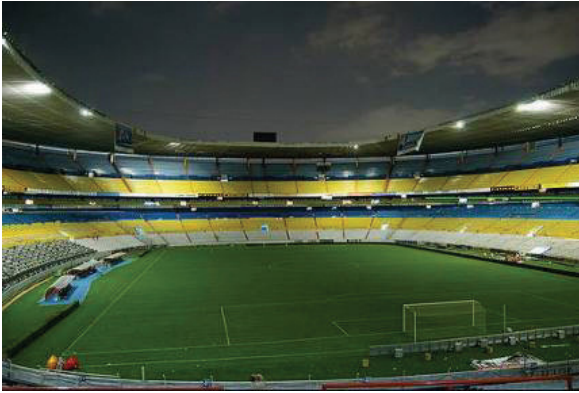
¿Cuándo se necesita?

El alumbrado sólo debe funcionar *mientras se realiza la actividad que lo justifica*. Prolongar su funcionamiento cuando esta actividad ya ha cesado representa un gasto y un consumo energético innecesarios. Por tanto, debe preverse el apagado de la iluminación mediante dispositivos manuales –interruptores– o automáticos –relojes, células fotoeléctricas, detectores de presencia...–, coordinados con los horarios de servicio de la actividad.

En el caso de los alumbrados exteriores, el funcionamiento del alumbrado es innecesario mientras se dispone de luz natural suficiente. Los dispositivos de en-



cendido y apagado han de tomar en consideración esta circunstancia y ajustarse al horario solar, teniendo en cuenta que éste varía a lo largo del año.



En muchas ocasiones, la actividad iluminada no cesa totalmente, pero a partir de una hora determinada su densidad de utilización disminuye marcadamente; puede tratarse, por ejemplo, del tráfico en una calle a horas de la madrugada, o de un terreno deportivo utilizado para entrenamiento y no para competición. Generalmente, la necesidad de iluminación está relacionada con la intensidad de uso, por lo que en períodos de menor actividad podrá reducirse el nivel de iluminación y, por tanto, las repercusiones medioambientales del alumbrado.

Respondiendo a estas preguntas, se puede analizar de forma conceptual el alumbrado y su función. Sin embargo, es necesario profundizar en la parte técnica y cuantificar la reducción de la emisión dañina. El foco contaminante se analizará en los subapartados siguientes.

¹ Para ampliar conceptos en el campo de la luminotecnía se recomiendan, entre otros, los siguientes enlaces: <<http://sites.upc.edu/grlum/manual>> y <http://www.indal.es/portal2/cm/indalux/pages/doctecnicaesp?locale=es_ES>.

² Estudio de la Universidad de Yale (10 de junio de 2011): <http://www.nsf.gov/discoveries/disc_summ.jsp?cntn_id=119737&WT.mc_id=USNSF_1>.

³ En realidad, el flujo que ilumina la parte baja de las fachadas es útil también, pues ilumina a las personas u otros objetos que estén en la acera: obsérvese el peatón situado a la derecha del esquema. Así pues, deberíamos considerar flujo útil el comprendido en el ángulo U1.

→ 3



Situación a escala mundial.

La CL es un fenómeno distribuido de forma muy desigual en el globo terrestre. A pesar de estar muy relacionado con la actividad humana, está directamente vinculado a los países desarrollados que han implantado de forma generalizada el alumbrado artificial nocturno en sus calles, carreteras, fábricas...



Montaje fotográfico del aspecto que tendría la Tierra de noche
Fuente: <<http://www.nasa.gov>>

En la imagen anterior, se observa la localización de los focos contaminantes más importantes. El desarrollo de éstos ha sido relativamente reciente (como se ha visto en el apartado 2.1) y su efecto contaminante persiste a unos centenares de kilómetros alrededor del foco.

3.1. Situación geográfica y evolución

El interés por proteger el cielo nocturno de la CL es creciente y, por tanto, resulta necesario realizar un seguimiento periódico de la situación a escala mundial.

Para analizar la evolución de la CL, existen dos tipos de mapas:



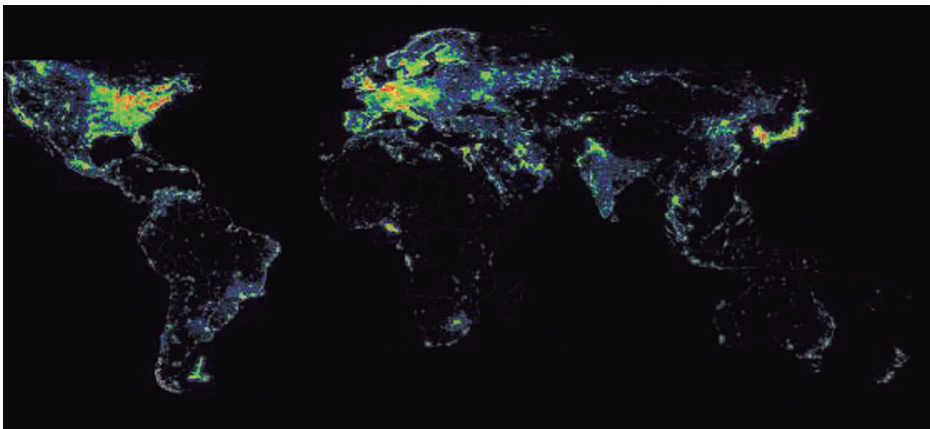
Seguimiento de imágenes por satélite

Imágenes nocturnas de la Tierra obtenidas por el programa DMSP de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos desde principios de los años setenta.

A partir de 1998, se dispone de datos más precisos, lo que permite realizar mediciones cuantitativas del flujo emitido por las fuentes de luz hacia el cielo.

Dependiendo del tipo de mapa, podemos explicar detalles como la dispersión de la luz por moléculas y aerosoles, el contenido de estos aerosoles en la atmósfera, la curvatura de la Tierra, el brillo natural del cielo o la extinción estelar.

Atlas nocturno mundial
(Cinzano, 2001)
(Fuente: <<http://www.lightpollution.it/dmsp/index.html>>)



Los mapas son una de las herramientas utilizadas para efectuar el seguimiento del impacto de la CL en un territorio determinado. Se utilizan sensores remotos, capaces de percibir la intensidad de iluminación de la superficie terrestre durante la noche. Estos valores de intensidad pueden ser traducidos a niveles de contaminación, estableciendo umbrales de tolerancia. (P. Cinzano; F. Falchi; C. D. Elvidge, 2001).

Uno de los satélites que en la actualidad aporta mejor información en este sentido es el sensor OLS (Operational Linescan System). Este sensor pertenece al *Defense Meteorological Satellite Program* (DMSP) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (National Oceanic & Atmospheric Administration, NOAA). El instrumento OLS capta imágenes tanto en el espectro visible como en el infrarrojo térmico, y así proporciona, en las imágenes captadas en pasadas nocturnas, información de la luz emitida desde la superficie de la Tierra y de datos térmicos de la misma.

Se trata de satélites que se hallan a poca altitud (830 km) en la órbita polar sincrónica al Sol, con un período orbital de 101 minutos. Por la noche, la OSL utiliza un tubo fotomultiplicador (PMT) para intensificar la señal de banda visible. El objetivo de esta intensificación es observar las nubes iluminadas por la Luna.

Los datos PMT tienen una amplia respuesta espectral de 440 a 940 nm (485 a 765 nm FWHM), con mayor sensibilidad en la región de 500 a 650nm. Esto



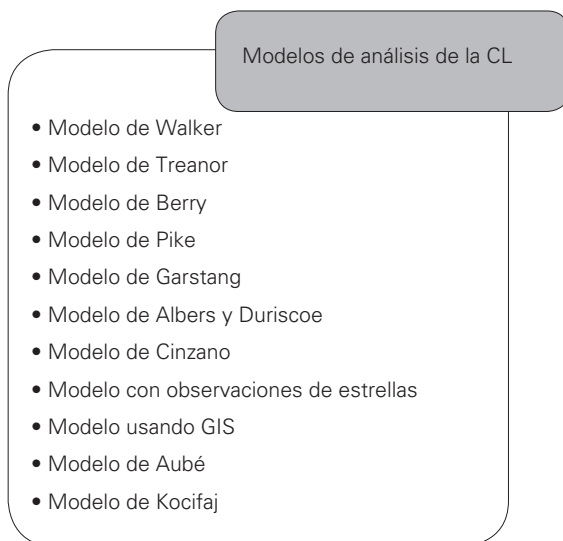
cubre el rango de emisiones primarias de las lámparas más utilizadas en iluminación exterior.

Los colores del mapa de la figura anterior corresponden a los cocientes entre el brillo artificial y el brillo natural del cielo:

<0,01	negro	1-3	amarillo
De 0,01 a 0,11	gris oscuro	3-9	naranja
De 0,11 a 0,33	azul	9-27	rojo
De 0,33 a 1	verde	<27	blanco

Métodos matemáticos

En la actualidad, existen diversas metodologías para medir la CL a diferentes puntos del foco contaminante. Tienen su origen en el siglo xx y los modelos matemáticos más importantes son:



En 1970, Walker presentó un modelo que toma en cuenta la cantidad de población de las ciudades y su relación con la CL. El modelo también se basa en la distancia que existe entre la ciudad y el observador.

En 1973, Treanor se basó en la fórmula de Walker y la mejoró introduciendo factores que correspondían a la dispersión que experimenta la luz por las moléculas en suspensión. Todo modelo lumínico ha de considerar la dispersión por aerosoles a través de una atmósfera homogénea. Estas fórmulas fueron mejoradas sucesivamente con la introducción de nuevas consideraciones, como la contaminación producida por el brillo del cenit de la luz proveniente de pequeñas ciudades, por parte de Berry y Pike, entre otros.



En 1984, Garstang presentó un modelo para la medición de la CL que representaba el brillo del cielo de noche, basándose en la luminancia del cielo nocturno. Se apoyó en el modelo de Walker para comprobar sus resultados. El modelo de Garstang también fue realizado con el objetivo de localizar futuras ubicaciones para observatorios astronómicos.

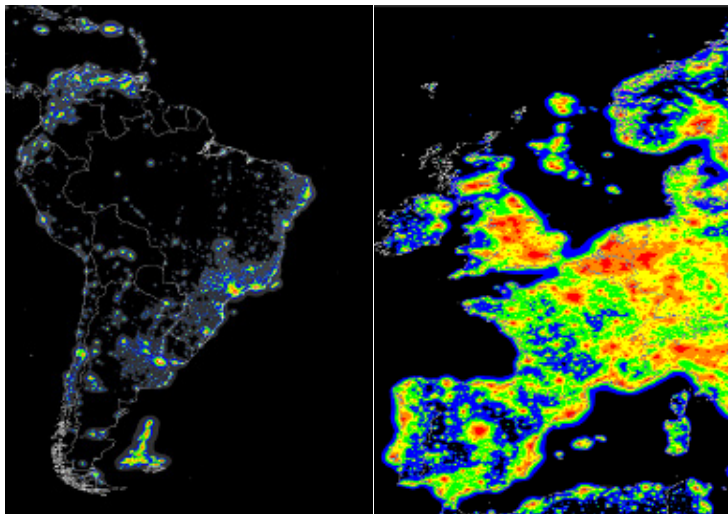
El modelo de Garstang presentaba algunas características que lo hacían más atractivo que sus antecesores, aunque continuaba con la estandarización del flujo lumínico por habitante a partir de estimaciones empíricas. Generalizaba la ciudad como un disco uniforme parecido a una fuente puntual; utilizaba una escala de atmósferas tomando en cuenta los aerosoles y moléculas; agregaba un parámetro que representaba el número de aerosoles; permitía un modelado angular de la distribución de luz, y tomaba en cuenta una distribución lambertiana para los reflejos y el flujo lumínico que parte de los focos contaminantes.

Otro factor, que aún no se había tomado en cuenta y que es de suma importancia, es la orografía o las características topográficas del terreno. En 2005, Aubé desarrolló un modelo llamado ILLUMINA, que no sólo tiene en cuenta los factores que funcionaban para el modelo de Garstang, sino que también utiliza variables, como las variaciones en la topografía y la reflectancia que presentan las superficies a la luz.

El modelo de Aubé presenta una aproximación bastante buena y es acaso el modelo más exacto que existe actualmente, pues contabiliza los aerosoles y la CL en tiempo y espacio. Sin embargo, entre las desventajas que presenta se encuentra que no sólo utiliza una fórmula o modelo matemático, sino que también se necesita un espectrofotómetro de precio elevado para hacer comparaciones con los datos obtenidos y determinar la cantidad exacta de aerosoles. Además, también se necesitan conocimientos especializados para utilizar los instrumentos requeridos, y las computaciones pueden tomar días en un ordenador normal.

La situación actual a escala mundial a vista de satélite muestra que los continentes con un mayor índice de desarrollo son los que presentan una mayor CL.

Mapa nocturno de Europa y de América del Sur
(Fuente: <<http://www.lightpollution.it/dmsp/index.html>>)





Tal y como se puede observar en la vista comparativa de satélite de los continentes europeo y suramericano, el brillo artificial presenta grandes diferencias. Las potencias desarrolladas han implantado, de forma generalizada, el alumbrado artificial nocturno. El desarrollo es un motor de la demanda de energía y, al mismo tiempo, el uso de la energía ha de servir como motor para el desarrollo. Existe una clara relación entre el poder económico de la región y el uso del alumbrado, en gran medida por la tendencia a alargar la actividad diaria en horario nocturno.

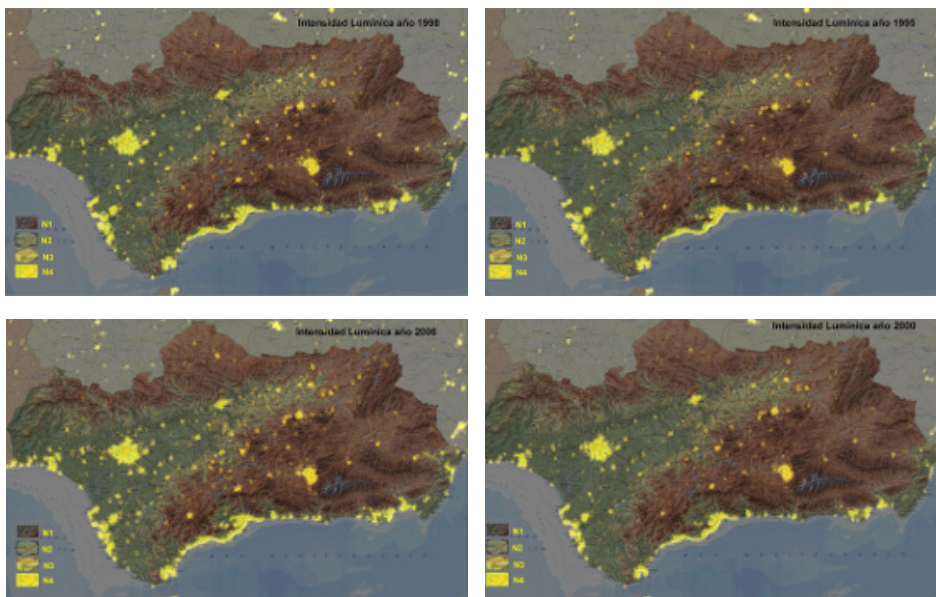
Así mismo, entre las regiones que presentan una mayor CL, ésta es mayor en los núcleos urbanos, en las grandes ciudades y en las zonas de mayor densidad y actividad.

Un desarrollo más detallado puede consultarse en el apéndice correspondiente.

Evolución de la problemática en el tiempo

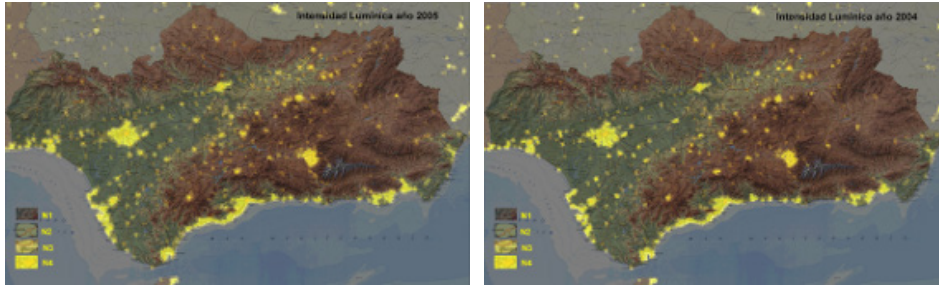
Recientemente, la concienciación social sobre la CL ha originado estudios que comparan el estado de la CL en diferentes regiones con el paso del tiempo.

Desde la Consejería de Medio Ambiente de Andalucía, por ejemplo, se está realizando una aproximación a este fenómeno, en el marco de las políticas de seguimiento del medio ambiente urbano y de desarrollo sostenible de la región. En el caso de Andalucía, podemos observar un aumento del brillo artificial con el paso de los años, debido a una mayor implantación de alumbrado artificial nocturno. Este aumento se concentra en los principales núcleos urbanos y a lo largo de todo el litoral.

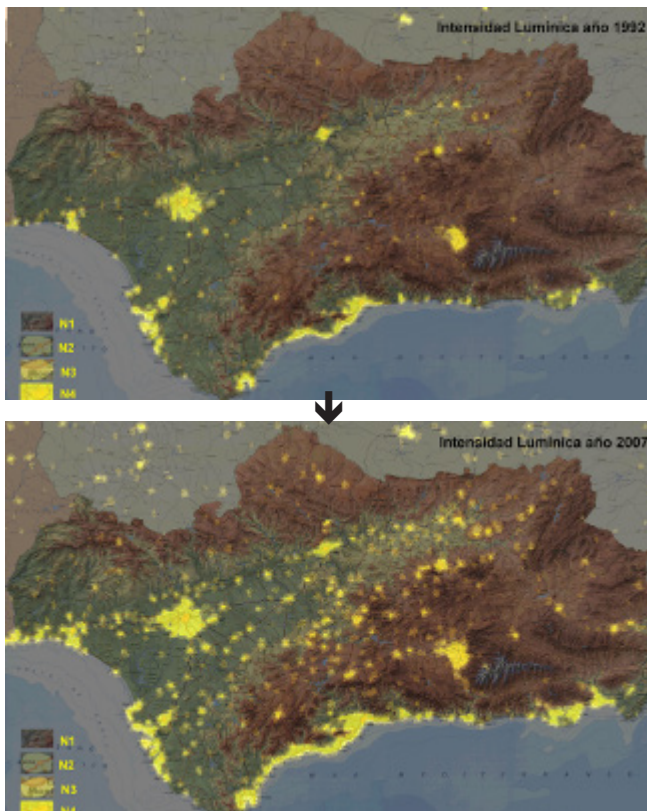




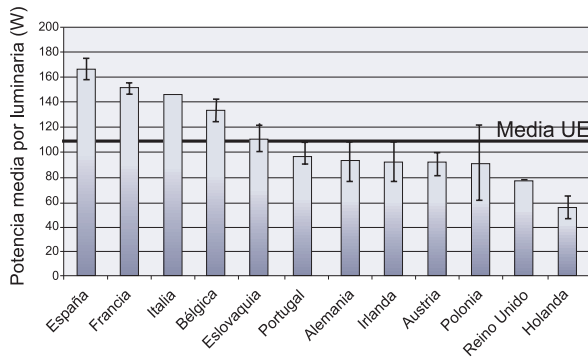
Evolución de la CL en Andalucía de 1992 a 2007
(Fuente: <<http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/>>)



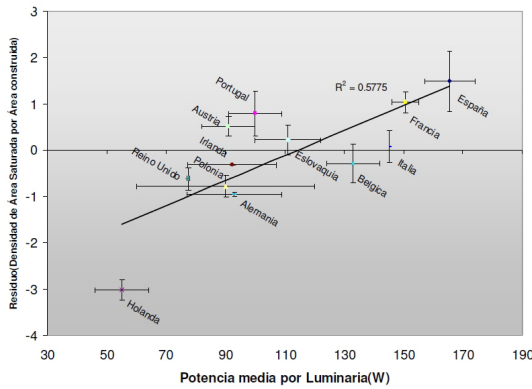
En los últimos 15 años, se ha registrado un aumento sustancial de la CL en Andalucía:



Si observamos los mapas de satélite y otros mapas de CL europeos o mundiales, parece que España tenga poca CL, pero no es más que un efecto de la baja densidad de población. Un estudio realizado por Alejandro Sánchez y Jaime Zamorano, del Departamento de Astrofísica de la Universidad Complutense de Madrid, pretende corregir este efecto para representar la CL real. Este estudio da validez a la corrección por potencia media e indica que España es el país más contaminante de Unión Europea y que es poco indicado para la observación astronómica, puesto que tiene la mayor tasa de superficie saturada en las imágenes nocturnas por superficie construida y la mayor potencia por luminaria.



Potencia media por luminaria
(Fuente: Alejandro Sánchez y Jaime Zamorano, Contaminación lumínica en España)



3.2. Normativa aplicable

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)	Normativa 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
	Ley de protección del medio nocturno: Ley 6/2001
	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

■ Aplicada ■ En desarrollo



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, Hawái, Maine, Michigan, Minnesota, Montana, Nuevo Méjico

Aparte 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”
- “Guía para la limitación de los efectos molestos de la luz procedente de las instalaciones de iluminación en exteriores” Publicación CIE-150: 2003.

Y 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 Lightning Energy Consumption.

Cabe mencionar que los reglamentos y las leyes son, a menudo, *obligaciones de mínimos*, y no guías que se recomiende seguir. Con frecuencia, se puede ser más proteccionista que lo que la ley obliga, por lo que es importante conocer el efecto y la magnitud de la contaminación para poder reducirla al mínimo en cada proyecto o instalación.

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.

La estrategia de actuación y la estructura principal de cualquier normativa o reglamentación sobre la CL sigue los parámetros y el desarrollo que se presentan a continuación:

Zonificación

Las diferentes zonas se clasifican en función de su sensibilidad respecto a la CL. Esta zonificación permitirá determinar límites posteriores para minimizar el efecto del fenómeno sin afectar a la actividad que en ella se realice.

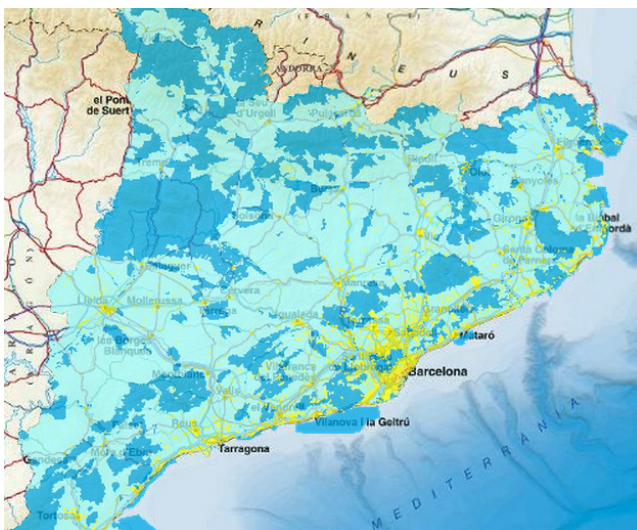


El grado de mayor protección será para las zonas E1 y el de menor protección, para las zonas E4:

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.

La iluminación del suelo urbano próximo a las zonas de máxima protección (E1) o a las zonas acuáticas marinas y continentales ha de ser especialmente respetuosa para evitar efectos perturbadores en el medio.

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.



Ejemplo de zonificación: Catalunya
(Fuente: <<http://sima.gencat.cat/Visors/PCL/Inici.html>>)



Lámparas

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.

Decreto 82/2005, Cataluña (actualmente anulado)

Zona de protección	Horario de tarde	Horario de 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

VSBP: Lámparas de vapor de sodio a baja presión.
VSAP: Lámparas de vapor de sodio a alta presión.

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.

Luminarias

La luminosidad del cielo producida por las instalaciones de alumbrado exterior depende del FHSi. 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



Clasificación de zonas	Flujo Hemisférico superior instalado FHS _{INST}
E1	≤ 1%
E2	≤ 5%
E3	≤ 15%
E4	≤ 25%

Decreto 82/2005, Cataluña (actualmente anulado)

Z: Zona de protección	V. Horario de tarde	N: Horario de noche
Z	V	N
E1	1	1
E2	5	1
E3	15	15
E4	25	25

Decreto 48/2010, Cantabria

Zona de protección	Flujo de Hemisférico Superior Instalado
E1	1%
E2	2%
E3	3%
E4	≤ 5%

Decreto 357/2010, Andalucía

En los proyectos, el FHSi 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.

Valores límite del FHS _{INST} según zonificación	
E1	≤ 1%
E2	≤ 5%
E3	≤ 15%
E4	≤ 15%
Para alumbrado viario en general	≤ 5%

También existen limitaciones y recomendaciones en lo referente a la implantación de sistemas de proyectores.



Niveles lumínicos

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... Y, para iluminaciones no funcionales, dependiendo de la zona de protección: iluminación intrusa máxima en superficies verticales, luminancias máximas de fachadas...

Por ejemplo, en el caso de las iluminaciones no funcionales:

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 (E_v)	2 lux	5 lux	10 lux	25 lux
Intensidad luminosa emitida por las luminarias (I)	2.500 cd	7.500 cd	10.000 cd	25.000 cd
Luminancia media de las fachadas (L_m)	5 cd/m ²	5 cd/m ²	10 cd/m ²	25 cd/m ²
Luminancia máxima de las fachadas ($L_{m\max}$)	10 cd/m ²	10 cd/m ²	60 cd/m ²	150 cd/m ²
Luminancia máxima de señales y anuncios luminosos ($L_{m\max}$)	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	ME5	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

Decreto 48/2010, Cantabria

Parámetros luminotécnicos	Valores máximos			
	E1	E2	E3	E4
Iluminancia vertical (E_v)	2 lux	2 lux	5 lux	10 lux
Intensidad luminosa emitida por las luminarias (I)	2.500 cd	7.500 cd	10.000 cd	25.000 cd



Luminancia media de las fachadas (L_m)	2 cd/m ²	4 cd/m ²	6 cd/m ²	12 cd/m ²
Luminancia máxima de las fachadas ($L_{m\max}$)	10 cd/m ²	10 cd/m ²	60 cd/m ²	150 cd/m ²
Luminancia máxima de señales y anuncios luminosos ($L_{m\max}$)	40 cd/m ²	300 cd/m ²	600 cd/m ²	1.000 cd/m ²
Incremento de umbral de contraste (TI)	TI=10% para adaptación a $L=0,1$ cd/m ²	TI=10% 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

Decreto 82/2005, Cataluña (actualmente anulado)

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

- a) 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 y las intensidades lumínicas de la tabla.

Z: Zona de protección	V. Horario de tarde	N: Horario de noche
Z	V	N
E2	50	0,5
E3	100	1
E4	100	2,5

Tabla .
Intensidad luminosa máxima emitida en dirección a áreas protegidas (E1), expresada en kilocandelas (Kcd).

Z: Zona de protección;
V: Horario del atardecer;
N: Horario de noche

Z: Zona de protección	V. Horario de tarde	N: Horario de noche
Z	V	N
E1	2	1
E2	5	2
E3	10	5
E4	25	10

Tabla .
Iluminación intrusa máxima en superficies verticales, expresada en lux

Z: Zona de protección;
V: Horario del atardecer;
N: Horario de noche

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 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.



Régimen de funcionamiento

Con mayor o menor permisividad, debe limitarse el horario de funcionamiento de las instalaciones.

Real Decreto 1890/2008

1. Los sistemas de accionamiento garantizarán que las instalaciones de alumbrado exterior se enciendan y apaguen con precisión, cuando la luminosidad ambiente lo requiera.

2. Para obtener ahorro energético en casos tales como instalaciones de alumbrado ornamental, anuncios luminosos, espacios deportivos y áreas de trabajo exteriores, se establecerán los correspondientes ciclos de funcionamiento (encendido y apagado) de dichas instalaciones, para lo que se dispondrá de relojes astronómicos o sistemas equivalentes, capaces de ser programados por ciclos diarios, semanales, mensuales o anuales.

3. Las instalaciones de alumbrado exterior, con la excepción de túneles y pasos inferiores, estarán en funcionamiento como máximo durante el período comprendido entre la puesta del Sol y su salida o cuando la luminosidad ambiente lo requiera.

4. Cuando se especifique, los alumbrados exteriores tendrán dos niveles de iluminación de forma que, en aquellos casos del período nocturno en los que disminuya la actividad o características de utilización, se pase del régimen de nivel normal de iluminación a otro con nivel de iluminación reducido, manteniendo la uniformidad.

5. Se podrá variar el régimen de funcionamiento de los alumbrados ornamentales, estableciéndose condiciones especiales, en épocas tales como festividades y temporada alta de afluencia turística.

6. Se podrá ajustar un régimen especial de alumbrado para los acontecimientos nocturnos singulares, festivos, feriales, deportivos o culturales, que compatibilicen el ahorro energético con las necesidades derivadas de los acontecimientos mencionados.

Decreto 82/2005, Cataluña

Se considerará horario de regulación:

- Horario de tarde: desde la puesta del Sol a las 22.00 h (UTC).*
- Horario nocturno: desde las 22.00 h (UTC) hasta la salida del Sol.*

Se deberá proceder a la desconexión a la hora de la regulación, excepto en casos especiales, competiciones deportivas, etc.

Los alumbrados ornamentales y navideños tendrán un funcionamiento máximo hasta la 1.00 de la madrugada. Los últimos, un máximo de 168 horas al año, durante un calendario determinado.



Decreto 357/2010, Andalucía

1. *Con carácter general, se establece como horario nocturno el comprendido en la franja horaria siguiente:*

a) *Desde las 0.00 h hasta las 6.00 h, en el período de la hora de invierno.*

b) *Desde la 1.00 h hasta las 6.00 h, en el período de la hora de verano.*

2. *Los ayuntamientos podrán establecer de forma justificada, en sus ordenanzas municipales, ampliaciones al horario nocturno.*

3. *Todas las instalaciones de alumbrado exterior, tanto las nuevas como las existentes, deben estar dotadas con sistemas automáticos de regulación o encendido y apagado que les sean necesarios para el cumplimiento de lo establecido en este Reglamento, así como en el Real Decreto 1890/2008, de 14 de noviembre.*

4. *En zonas clasificadas como E1 y E2, el alumbrado exterior que no sea necesario por motivos de seguridad se mantendrá apagado durante el horario nocturno.*

5. *Las instalaciones de alumbrado exterior que estén situadas en zonas clasificadas como E3 y E4 deben reducir, en la medida de lo posible, el flujo luminoso durante el horario nocturno con respecto a los límites que les sean aplicables, manteniendo la uniformidad de la iluminación.*

→ 4



Cuantificación de la contaminación lumínica

En este apartado, se presenta la forma de cuantificar la influencia potencial de la CL en el entorno, orientada al proyecto luminotécnico. Primero, se describen las afectaciones más sencillas y se analizan los componentes de los sistemas de alumbrado (lámparas y luminarias), para posteriormente presentar la metodología RAMA-L. En la última parte del apartado, se muestra un modelo matemático de cuantificación del brillo natural nocturno según las características y dimensiones del foco contaminante es decir, las instalaciones de alumbrado

El objetivo es conocer la magnitud de la intrusión de la actividad humana en el entorno a nivel del proyecto, de forma que su impacto pueda minimizarse considerando diferentes alternativas de diseño.

4.1. Influencia de las fuentes de luz

Las fuentes de luz son los emisores de radiación en el alumbrado artificial nocturno. Dependiendo de su espectro de emisión, serán potencialmente más contaminantes o menos (según la sensibilidad del entorno donde se implanten). En la tabla que se incluye a continuación, vemos un resumen de las características más importantes de las fuentes de luz, teniendo en cuenta su tipología, eficacia y espectro de emisión. Se han diferenciado aquellas fuentes de luz que, debido a su temperatura de color o a su tecnología específica, puedan representar diferencias significativas en sus propiedades:

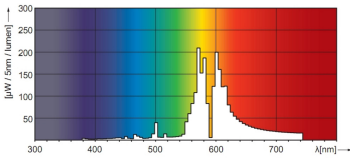
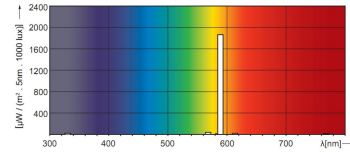
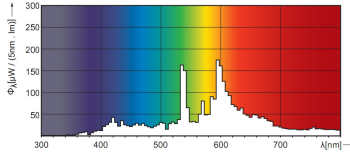
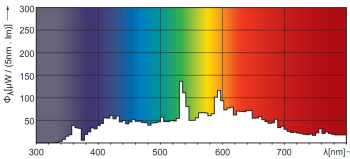
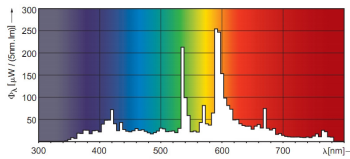
Las familias de lámparas descritas serán:

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

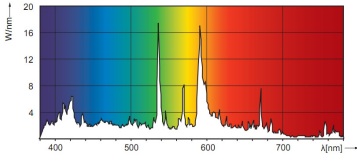
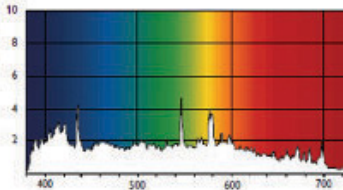
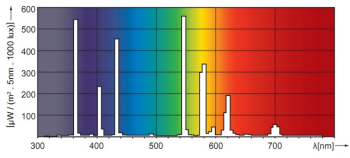
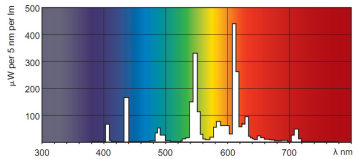
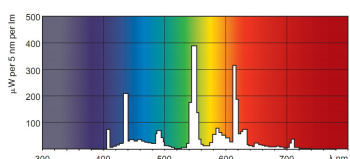
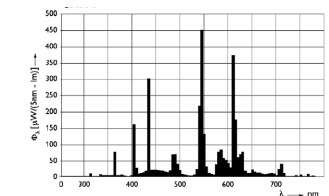


En el siguiente apartado se hablará de lámparas. Ya se hizo en el apartado B:3, pero el objetivo del presente no es realizar una descripción general de las fuentes de luz, si no un resumen de los parámetros y características más importantes que inciden en la CL para posteriormente poder valorar numéricamente su afectación al entorno mediante una variable que cuantifique la dispersión de la luz en la atmósfera.

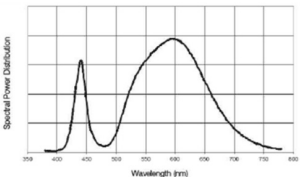
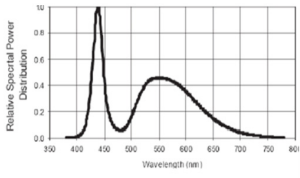
Tabla resumen de lámparas, según diferentes familias y en función de la tonalidad de la luz

TIPOLOGÍA		Muestra ejemplo de distribución espectral Fuente: Philips (2011)	Emisión radiada con respecto a la total visible (en %)		Eficacia
VAPOR DE SODIO	Alta presión		< 440 nm	0-5%	100 lm/W
	Baja presión		< 440 nm	0-5%	
HALOGENURO METÁLICO	Cerámico caliente		< 440 nm	5-15%	90 lm/W
	Cerámico frío		< 440 nm	15-25%	
	Cuarzo caliente		< 440 nm	15-25%	



TIPOLOGÍA		Muestra ejemplo de distribución espectral Fuente: Philips (2011)	Emisión radiada con respecto a la total visible (en %)		Eficacia
HALOGENURO METÁLICO	Cuarzo frío		< 440 nm	15-25%	85 lm/W
	Alta potencia		< 440 nm	15-25%	
VAPOR MERCURIO	-		< 440 nm	25-50%	50 lm/W
			Entre 440 nm y 525 nm	0-5%	
FLUORESCENCIA	Cálida		< 440 nm	5-15%	70 lm/W
	Fría		< 440 nm	15-25%	
			Entre 440 nm y 525 nm	15-25%	
			> 525 nm	+50%	
INDUCCIÓN	-		< 440 nm	15-25%	70 lm/W
			Entre 440 nm y 525 nm	5-15%	
			> 525 nm	+50%	



TIPOLOGÍA		Muestra ejemplo de distribución espectral Fuente: Philips (2011)	Emisión radiada con respecto a la total visible (en %)		Eficacia
LED	Cálida	 <p>T=3000 K</p>	< 440 nm	5-15%	70 lm/W
			Entre 440 nm y 525 nm	5-15%	
			> 525 nm	+50%	
	Fría	 <p>T=5500 K</p>	< 440 nm	15-25%	95 lm/W
			Entre 440 nm y 525 nm	15-25%	
			> 525 nm	+50%	

La proporción de emisión por debajo de 525 nm pero, sobre todo, bajo los 440 nm nos indica cuán potencialmente peligrosa es por su afectación a los ritmos biológicos (ciclos circadianos), a la biodiversidad nocturna (mayoritariamente sensible a estas radiaciones) y a la difusión atmosférica. En este sentido, la afectación de una lámpara u otra puede cuantificarse de manera sencilla. El Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) propone la forma siguiente:

Factor de Reducción de la contaminación con respecto a la luz blanca (FR):

Tipo de lámpara	FR
Vapor de mercurio	1
Halogenuros metálicos	1
LED	1
Incandescente	1/2
Halógena	2/3
Vapor de sodio a alta presión	2/3
Vapor de sodio a baja presión	1/3

Estos factores tienen en cuenta la difusión de la luz en la atmósfera según la dispersión de Rayleigh, según la cual ésta es inversamente proporcional a la longitud de onda, elevada a la cuarta potencia.

Están en desarrollo factores más precisos para diferentes tipos de lámparas, también según su distribución espectral específica, por lo que el FR va variando y actualizándose continuamente.



La lámpara de vapor de sodio a baja presión es la que menos repercusión presenta en la dispersión atmosférica: una tercera parte de la que tiene la lámpara de vapor de mercurio (por ejemplo).

4.2. Influencia de las luminarias

Independientemente de su implantación y del entorno (analizado en apartados posteriores), el factor determinante en las luminarias es el Flujo Hemisférico Superior instalado, que nos indica cuán elevada puede ser la emisión a la cúpula celeste.

En una iluminación vial funcional, se tiende a minimizar, puesto que nunca proporciona un beneficio lumínico en el suelo.

Se buscará el uso de luminarias de cierre plano transparente y de óptica adecuada. Por ejemplo, en el caso de las luminarias de tipo clásico:

LUMINARIA AMBIENTAL DE ÉPOCA						
Rend	Fu	FHSi	Ejemplos			
60%	20%	35%				

Luminaria ambiental de época con protección física superior considerable. Lámpara ubicada en la parte central



POR LUMINARIA AMBIENTAL DE ÉPOCA						
60%	35%	5%				

Cambio por luminaria ambiental de época con grupo óptico integrado en el cuerpo y difusor plano.

Una forma de cuantificar el flujo lumínico contaminante de las luminarias es la magnitud de *FHSsaliente*: es la suma del flujo lumínico que va por encima de la horizontal en una instalación en todas las luminarias (n) de una instalación.

$$FHSsaliente = \sum_1^n FHSi \times \phi_{lámp}$$

donde:

FHSsaliente: Totalidad del flujo que sale de las luminarias de la instalación por encima de la horizontal.

n: Número de luminarias.



Φ_{lamp} : Flujo lumínico de cada lámpara dentro de una luminaria.

Esta magnitud es puramente teórica, puesto que presenta varias carencias:

- No tiene en cuenta el reflejo de la luz en las superficies que está iluminando (por ejemplo, el suelo).
- No tiene en cuenta los obstáculos que el flujo lumínico puede encontrarse a la salida de la luminaria (como las fachadas de los edificios).

Estas carencias son resueltas por el método RAMA-L, que se explica en el siguiente apartado.

Desde el punto de vista del vector de análisis energético, cabe mencionar que con una buena selección de luminarias y lámparas se puede lograr una reducción sensible de la potencia instalada, manteniendo un mismo nivel de iluminación. En efecto: si mejoramos el porcentaje útil de la emisión de la lámpara, con un flujo de lámpara inferior podremos alcanzar el mismo nivel de iluminación. Veamos un ejemplo en la tabla siguiente:

Lámpara	Flujo de lámpara en (lm)	Tipo de luminaria	Factor de utilización	Flujo útil (en lm)
Vapor de sodio 70 W	7.000		0,4	2.800
Vapor de mercurio 250 W	12.500		0,2	2.500

4.3. Método RAMA-L: cuantificación de la emisión contaminante en una instalación

Se conoce la CL como un fenómeno de la actividad nocturna humana que altera el medio natural. Técnicamente, otra definición aceptada es:

Emisión de flujo luminoso de fuentes artificiales nocturnas en intensidades, direcciones o rangos espectrales innecesarios para la realización de las actividades previstas en la zona en que se han instalado las luminarias.

Fuente: Ley 6/2001 del Parlament de Catalunya

De esta definición, podemos extraer las siguientes componentes:

- *Intensidad de la fuente luminosa.* La intensidad con la que la luz ilumina las zonas a las cuales ha de dar servicio. Un exceso de intensidad lumínica incrementa la CL por reflexión.



Iluminación con niveles lumínicos excesivos (izq.)

La emisión lumínica en una dirección no adecuada produce intrusión lumínica.. (der.)

- *Dirección de la emisión de luz.* La emisión de luz ha de ser dirigida hacia la zona a la cual se pretende dar servicio y durante la prestación del mismo. En caso de estar mal dirigida, ésta ocasiona CL (ya sea hacia el cielo o hacia los ecosistemas naturales o humanos).
- *Rango espectral.* La emisión de energía lumínica en longitudes de ondas cortas, en la gama de los azules y los violetas, ocasiona una mayor dispersión de la luz en la atmósfera y tiene una afectación más importante en las observaciones astronómicas e intrusión en la vida natural de los ecosistemas.

Es especialmente importante la precisión: “en intensidades, direcciones o rangos espectrales innecesarios para la realización de las actividades previstas en la zona en que se han instalado las luminarias”. Es decir, a nivel de control reglamentario o de normativa, se considera CL sólo aquella aportación de iluminación artificial que excede las necesidades humanas para la actividad que se debe realizar, o las malas prácticas en el diseño de la instalación.

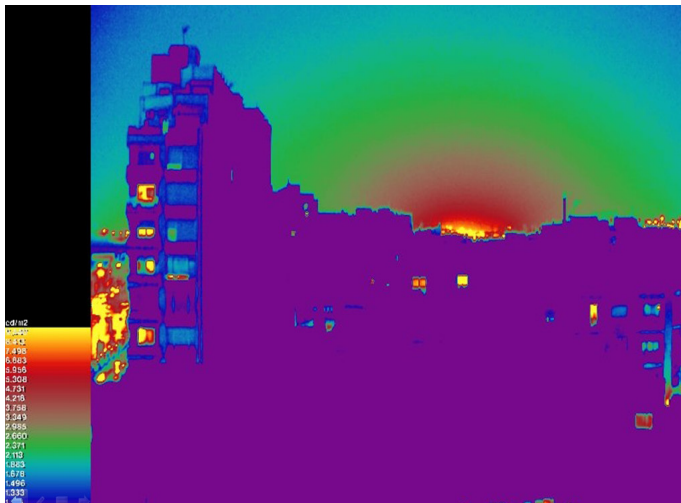
Sin embargo, pese a tener una instalación correctamente dimensionada y proyectada según las necesidades humanas, el *impacto ambiental* puede ser importante.

Un ejemplo podría ser la construcción de un estadio de fútbol, en que se requieren niveles de iluminación muy elevados (para la retransmisión televisiva) y lámparas de espectro de emisión en los azules (para tener una buena reproducción cromática). Pese a estar correctamente diseñado y proyectado, el reflejo de la luz en las superficies y el espectro de emisión generan CL y, por tanto, afectación en el entorno.

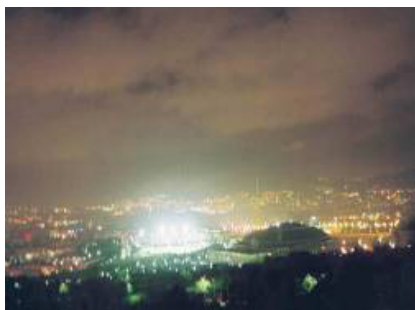
El método RAMA-L (Ratio y Análisis Medio Ambiental –Lumínico) tiene como objetivo cuantificar la magnitud del foco contaminante en la repercusión del resplandor luminoso y proporcionar herramientas para *introducir los cambios necesarios que permitan reducir los efectos perniciosos*.



Mapa de luminancias que muestra el incremento de brillo del cielo durante el encendido de un estadio de fútbol correctamente proyectado.
Fuente: elaboración propia



¿Cómo afecta la iluminación de este campo de fútbol a su entorno? En caso de sustituir los proyectores actuales por modelos asimétricos, ¿qué mejora en las condiciones lumínicas y qué reducción del impacto ambiental conseguiríamos?

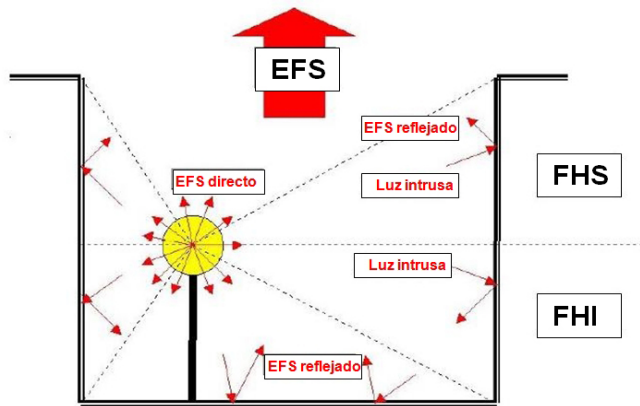


El modelo de análisis RAMA-L parte de la consideración del flujo emitido por el alumbrado, la geometría de la zona de implantación y las reflexiones de pavimentos y fachadas.

El planteamiento es esquemático y fácil de modelizar. Pueden incluirse puntos de luz no públicos, rótulos, ventanas, escaparates... –considerados como emisores difusos– y el tratamiento informático utiliza programas informáticos estándares (como los comentados RELux, DIALux...), aunque preferentemente en módulos de cálculo de interior, para poder determinar las reflexiones.

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.

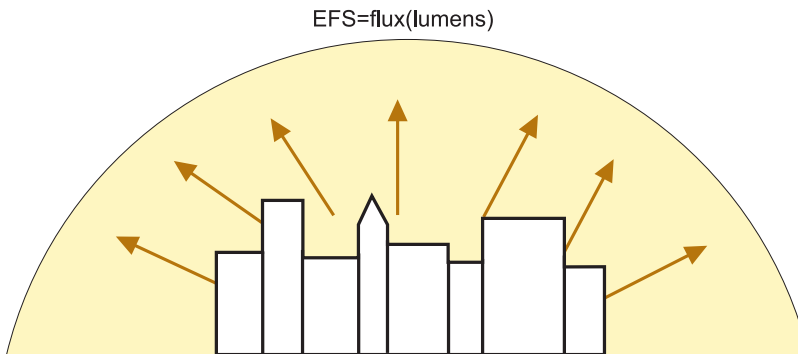
Las dos variables nuevas introducidas en el método son la Emisión de Flujo Superior (EFS) y el Grado Relativo de Emisión (GRE):



Emisión de flujo superior (EFS)

Se define como la cantidad de flujo lumínico que escapa de una instalación de alumbrado hacia el cielo.

Flujo lumínico que escapa de una ciudad



Su unidad es el lumen y tiene en cuenta:

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

De esta EFS total, y repitiendo el cálculo con un valor de coeficientes de reflexión = 0 (es decir, sin reflexión), podremos conocer la proporción debida a la *emisión directa o reflejada*. 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*.



Grado relativo de emisión (GRE)

Magnitud que relaciona el flujo lumínico con su distribución espectral. Es decir, la emisión energética en cada banda de longitud de onda. Se considera que las emisiones cercanas a los azules son potencialmente más perniciosas que las cercanas a las rojas.

Se calcula a través de la EFS corregida mediante el FR de la lámpara utilizada (v. apartado 4.1). Por ejemplo:

$$GRE = EFS_{EMISIÓN VAPOR MERCURIO} + 0,66 \cdot EFS_{EMISIÓN VAPOR SODIO ALTA PRESION}$$

Es una magnitud adimensional y da un valor de cuán contaminante es una instalación o un conjunto de instalaciones de alumbrado con respecto a la dispersión atmosférica. De forma genérica se puede usar la fórmula:

$$GRE = \sum_1^N FR_i \times EFS_i$$

Metodología de análisis

Fase 1: Estudio del caso objeto de análisis

En el estudio de la zona a iluminar, es necesario comprobar:

- La *instalación*, en componentes de alumbrado, posibles edificaciones u obstáculos para la luz.
- El *entorno*, para ver la sensibilidad a la intrusión lumínica, ya sea por la proximidad de hábitats protegidos, ámbitos domésticos, observatorios astronómicos...
- Los *usuarios* que han de utilizar esta instalación.

Para cada situación concreta, se deben considerar los requisitos lumínicos y de protección. A modo de ejemplo extremo, veremos que no se tendrá en cuenta el mismo desarrollo en el proyecto para un alumbrado de un estadio de fútbol de primera división (donde los niveles lumínicos serán muy elevados para el desarrollo de la actividad y para la retransmisión televisiva), que para una calle de una urbanización (donde los niveles serán puramente de seguridad para la circulación de vehículos).

La ubicación de una instalación en un parque natural puede limitar y restringir las soluciones lumínicas para conseguir una mayor protección del medio ambiente, por ejemplo forzando el uso de unas luminarias con FHSi reducido.

Es imprescindible analizar cada uno de los factores para definir los requisitos de la actividad artificial necesaria a desarrollar por el hombre, que nos determinará qué tipo de alumbrado debe utilizarse en cada caso.

El estudio del entorno ha de tomar en consideración los siguientes factores:



- La longitud de la calle [m]: la distancia en metros del caso a estudiar.
- La anchura de la calle [m]: la amplitud de la vía, incluyendo aceras, viales...
- La altura de los edificios en la calle [m]: la altitud media de los edificios que delimitan la vía (casas, oficinas, fábricas...).
- La separación de los edificios con respecto a la vía pública [m], en el caso de los jardines o instalaciones similares.
- Los tipos de fachada: para determinar el factor de reflexión de cada fachada e informatizar el sistema.

Tipo de fachada	Factor de reflexión
No existe	0
Obra vista	0,2
Gris, estucado	0,3
Estucado suave	0,5
Pintura blanca	0,6
Blanco mármol.	0,7

- El número de luminarias: la cantidad de puntos de luz a instalar en cada caso.
- La tipología de luminaria: el modelo de luminaria. Para informatizar el modelo en la fase siguiente, será necesario tener la fotometría de la misma.
- Las características de implantación de los puntos de luz: la disposición, la separación en metros, la altura, la orientación...
- Los tipos de lámpara y potencia, como por ejemplo:

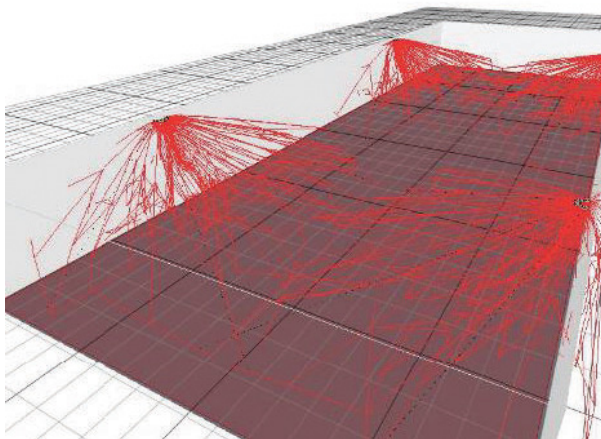
Lámpara
Vapor de mercurio
Vapor de sodio a baja presión
Vapor de sodio a alta presión
Fluorescente
Halogenuros
Inducción
LED

Fase 2: Informatización del sistema

Se informatizarán los datos recogidos, a fin de estudiar el comportamiento de la instalación y sus condicionantes. Este proceso es el normal para cualquier proyecto de alumbrado, añadiendo algunos componentes que condicionan la emisión de luz a superficies no útiles, como fachadas, alumbrado privado..., sin tener que realizar ningún tipo de operación extra para su desarrollo:

Esta fase se puede realizar mediante cualquier programa de cálculo lumínico (preferentemente, de alumbrado interior, para calcular las reflexiones más fácil-

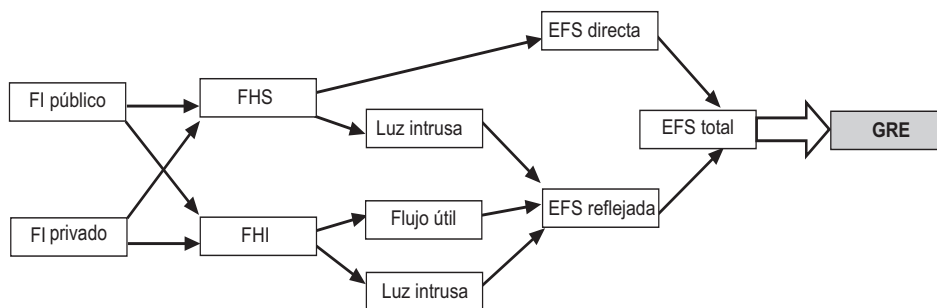
mente). En el presente estudio, se ha utilizado el genérico RELux <<http://www.relux.biz>>. Las fotometrías se pueden importar en cualquier formato estandarizado: LDT, IES..., para facilitar el desarrollo de esta fase.



Fase 3: Cálculo y extracción de resultados

A través del programa de cálculo y la iteración de diferentes posibilidades de funcionamiento horario y espacial, podemos obtener resultados finales de análisis. Estos pueden ser valorados según las magnitudes que hemos visto anteriormente:

- **Emisión de flujo superior (EFS).** Informáticamente, será el flujo lumínico que escape al “techo” de la calle o no, dependiendo de la consideración exacta del entorno.
- **Grado relativo de emisión (GRE)**



donde:

Flujo público: flujo instalado en alumbrado público

Flujo privado: flujo instalado en alumbrado privado

FHS: Flujo Hemisférico Superior



FHI: Flujo Hemisférico Inferior (complementario al anterior)

EFS: Emisión Flujo Superior

GRE: Grado Relativo de Emisión

Fase 4: Valoración de los resultados globales

Si consideramos diferentes ratios y lecturas luminotécnicas de resultados, podremos analizar no sólo el GRE y la EFS, sino también otras relaciones

EFS/FTI: fracción de la energía luminosa que se pierde hacia el cielo, de la total emitida por las lámparas.

Fútil/FTI: fracción de la energía luminosa que es realmente útil, de la total emitida por las lámparas.

Fintruso/FTI: fracción de la energía luminosa que puede representar una molestia o una amenaza *directa* al medio, de la total emitida por las lámparas.

...

donde:

FTI [lm]: flujo total instalado en las lámparas.

Fútil [lm]: flujo útil que llega a la superficie que se necesita iluminar.

Fintruso [lm]: flujo susceptible de entrar en una zona protegida o donde no estaba proyectada ninguna necesidad de iluminación.

Fase 5: Revisión de los resultados y posibilidades de mejora

Fase en la que se vuelve a estudiar el sistema objeto de análisis (usuario-instalación-entorno), para obtener una solución que presente un impacto ambiental inferior. Por ejemplo:

- Posibilidades de cambiar lámparas/luminarias
- Posibilidades de reorientar sistemas por proyección
- Optimización del sistema de control y reducción
- ...

al tiempo que se siguen satisfaciendo las necesidades de los usuarios en el entorno de análisis a través de la verificación de las condiciones lumínicas requeridas.



Ejemplo: Reducción de la emisión contaminante en una industria

Si consideramos un ejemplo práctico, podemos analizar el caso de una estación depuradora de aguas, concretamente su actual *emisión contaminante* y las posibilidades de minimizarla, dada su proximidad a zonas de alta protección.



Fase 1: Estudio del caso objeto de análisis

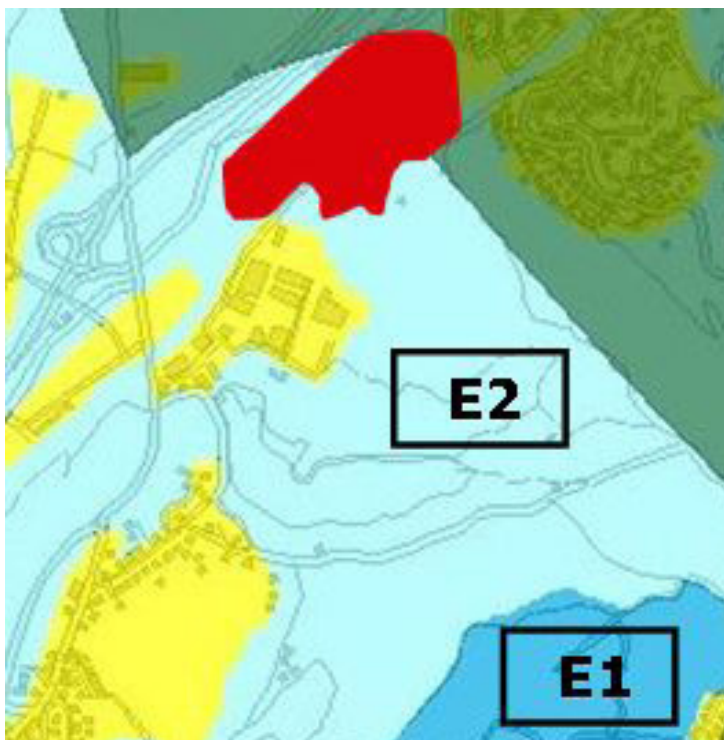
El *sistema* a analizar sería:

Instalación. Industria depuradora de aguas, con un alumbrado en las zonas de tránsito de vehículos, de aparcamiento, de carga y descarga, decantadores, filtros, alumbrado ornamental, rótulos... Tiene diferentes edificios, arbolado, etc.

El funcionamiento de los sistemas de alumbrado no presenta control ni reducción horarios, concebidos el fin de minimizar su impacto con respecto a la CL, ya sea en viales, rótulos, proyectores decorativos...

En la tabla resumen de los sistemas instalados, se indican en rojo los sistemas (lámparas y luminarias) que son potencialmente contaminantes e ilegales, ya sea por su FHSi (%) o por la naturaleza de sus fuentes de luz.

	FHSi (%)	Tipo de lámpara	Potencia (W)	Unidades	Potencia total (W)
Alumbrado vial	1%	VSAP	100	141	14.100
Parking	3%	FLUO	52	20	1.040
Decorativos	60%	HAL	150	16	2.400
Entrada de agua	30%	VSAP	400	7	2.800
Almacenaje	15%	VSAP	4500	1	4.500
Tratamiento de agua	15%	HAL	6950	4	27.800
Otras zonas	30%	VSAP	150	12	1.800
Rótulos	50%	NEO	300	1	300
Entrada	50%	VSAP	150	2	300



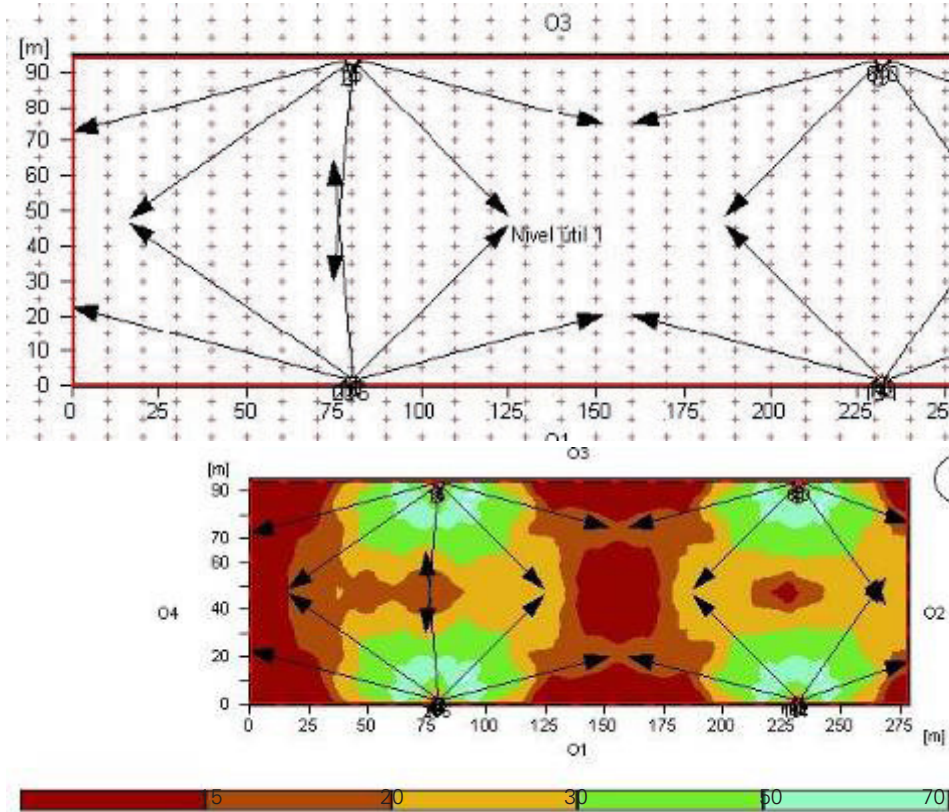
- **Entorno.** La implantación se realiza en una zona de protección E2, situada a 1,4 km de una zona de máxima protección (E1).
- **Usuario.** Las actividades que se realizan en las diferentes zonas son las siguientes (en horarios de tarde y de noche):
 - Zona de viales: Ronda de vigilancia. Se requieren 10 lux.
 - Zona de alumbrado de rótulos y decorativos: No hay actividad.
 - Zona de almacenaje: No hay actividad.
 - Zona de tratamiento de aguas: La actividad que se realiza en la instalación durante los horarios de tarde y noche es el de control de los sistemas automatizados de toda la zona. Para ello, se requiere una iluminación de 20 lux en las zonas de trabajo.
 - Otras zonas: No hay actividad.

Conforme a la norma Iluminación de lugares de trabajo. Parte 2: Lugares de trabajo exteriores (UNE EN-12464-2), se verifica que no hay requerimientos de IRC para estas zonas. Por tanto, se pueden utilizar lámparas de vapor de sodio en cualquier horario.



Fase 2: Informatización del sistema

Se reproducen las condiciones actuales en un programa informático.



General

Algoritmia de cálculo utilizada	Porción directa
Altura de superficie de valoración	0,01 m.
Altura de nivel de luminarias	25,00 m
Factor de mantenimiento	0,65
Flujo luminoso total de todas las lámparas	2.176.000 lm
Rendimiento global	18.080 W
Rendimiento total por superficie (26.505,00 m ²)	0,68 W/m ² (2,68 W/m ² /100 lx)

Intensidades lumínicas

Intensidad lumínica media	Em	25,5 lx
---------------------------	----	---------

Fase 3: Cálculo y extracción de resultados

Tras ello, se obtienen los siguientes resultados de impacto ambiental por cada zona:

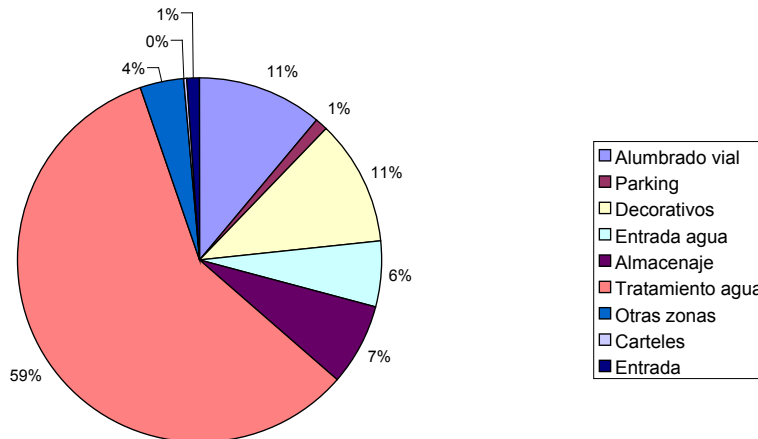


Ubicación	Cantidad	FHSi (%)	Tipo de lámpara	GRE
Alumbrado vial	141	1%	VSAP	87.159
Parking	20	3%	FLUO	8.761
Decorativos	16	60%	HAL	88.704
Entrada de agua	7	30%	VSAP	47.628
Almacenaje	1	15%	VSAP	56.194
Tratamiento de agua	4	15%	HAL	462.870
Otras zonas	12	30%	VSAP	30.618
Rótulos	1	50%	NEO	2.588
Entrada	2	50%	VSAP	8.798

Fase 4: Valoración de los resultados globales

Se observa que el foco contaminante más importante de la instalación se encuentra en la zona de "Tratamiento de agua", con un GRE del 59% del total:

Potencial de GRE de la instalación



Si analizamos la Emisión de Flujo Superior, obtenemos la ratio siguiente:

EFS/FTI: 19,5%

Es decir, una quinta parte de la luz que sale de las lámparas se emite hacia el cielo.

Fase 5: Revisión de los resultados y posibilidades de mejora

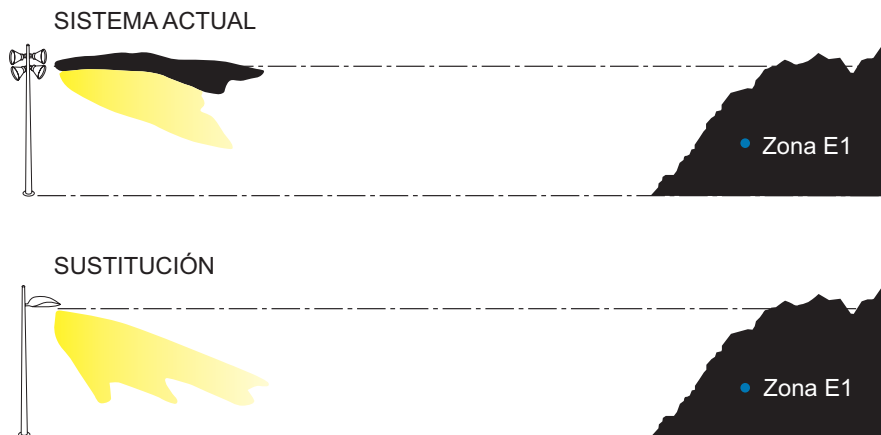
Ahora intentaremos determinar qué acciones de mejora pueden llevarse a cabo para minimizar el impacto.



En toda la instalación, las únicas zonas que se utilizan durante los horarios de tarde y noche son las zonas de tratamiento de agua y los viales. Las demás podrían estar apagadas. Además, el cartel publicitario y los proyectores decorativos deberían estarlo, en todo caso, a partir de las 22.00 h (UTC), según el Decreto 82/2005 de la Generalitat de Catalunya (puesto que la instalación está ubicada en Cataluña).

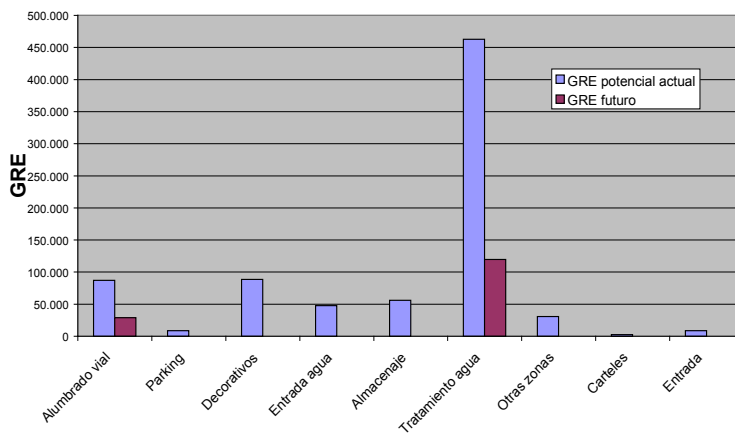
Se proponen las siguientes acciones:

- Apagar todas las instalaciones no necesarias por su actividad (proyectores decorativos, carteles publicitarios en horario nocturno, zonas de almacenaje...).
- Reducir los niveles de iluminación en los viales.
- Sustituir los sistemas de proyección de la zona de tratamiento de agua a proyectores asimétricos con orientación 0°, con lámparas de vapor de sodio en lugar de los halogenuros metálicos actuales.



Tras realizar el cálculo informático, obtendríamos:

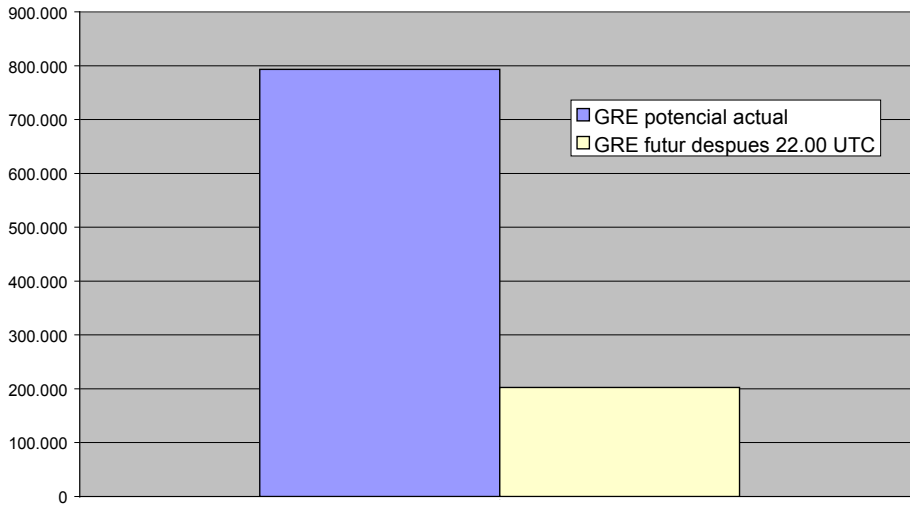
Grado relativo de emisión actual y previsto





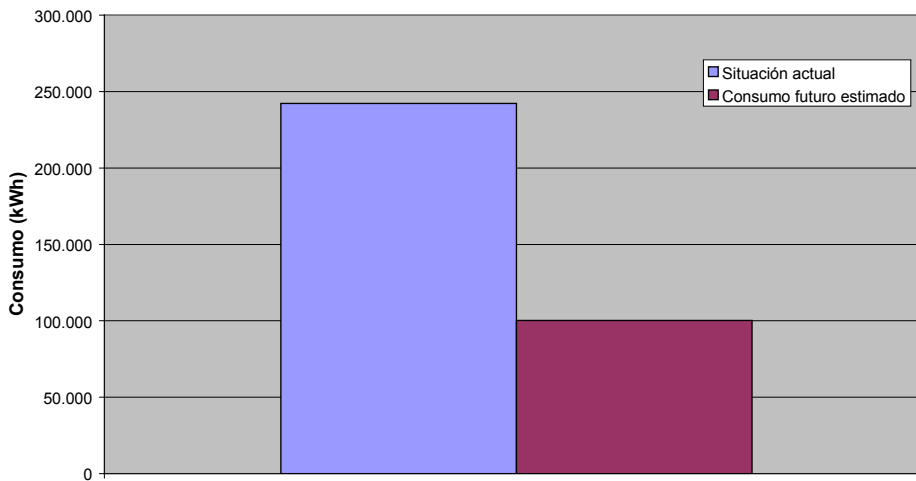
Comparación GRE total

Reducción del impacto ambiental a partir de las 22:00 h. UTC (GRE) en un 81%



Comparación de ahorro energético

Reducción de un 58,6% del consumo energético



Con este ahorro energético, se prevé que la inversión inicial para adecuar estas instalaciones se pueda recuperar en tres años.

Como comparación de una ratio resumen, observamos que hemos reducido la ratio *EFS/FTI* a 11,5% en horario nocturno.



Ejemplo: Resultados de la aplicación de alumbrado con la aportación de la iluminación privada

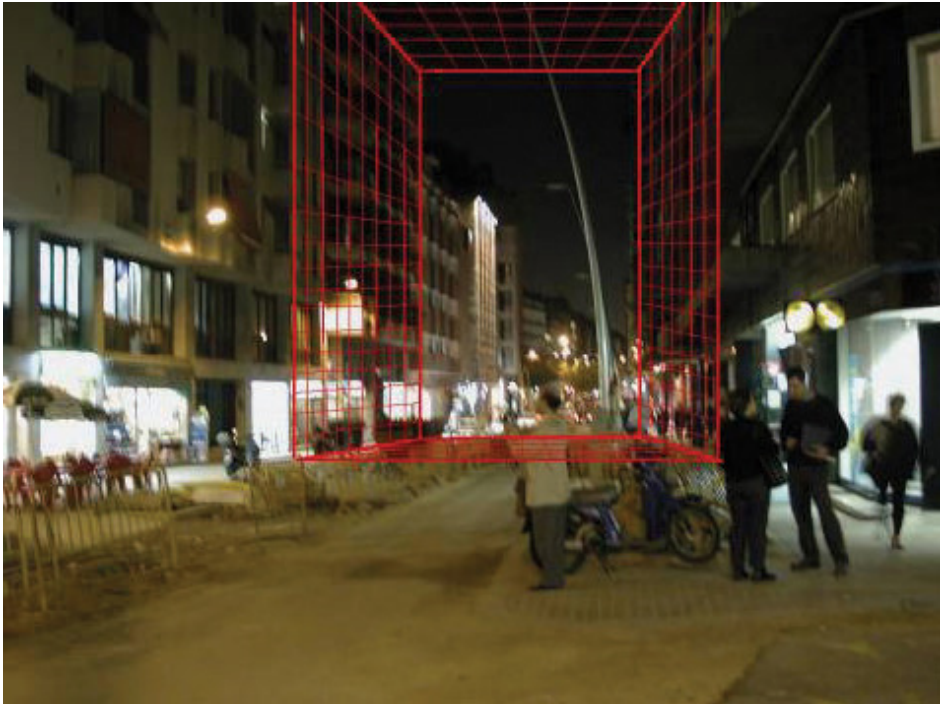
Como se ha comentado, también se puede comprobar la magnitud del foco contaminante de las luminarias según la fuente de su aportación:

- Alumbrado público
- Alumbrado privado

O según la forma con que llega a la zona protegida:

- Emisión directa
- Emisión por reflexión

Si analizamos una calle comercial de una ciudad, podemos ver:



Si viéramos su aportación según los parámetros estudiados, tendríamos:



DATOS GENERALES

Dimensiones (m)	
Ancho	17
Largo	64
Alto	25
FTI	
Relació a/h	0,68
Flujo (lm)	
Público	40500
Privado	5824

% público	87,4%
% privado	12,6%

RESULTADOS NUMÉRICOS

Todos en lúmenes

EFS		Directo		<i>Público</i>			
2720	652,8	24,0%		0	0,0%	Del total Dir	
				<i>Particular</i>	652,8	100,0%	Del total Dir
				<i>Público</i>	1849,6	89,5%	Del total Rel
				<i>Particular</i>	217,6	10,5%	Del total Rel
				Público	1849,6	68,0%	Del FTI
				Privado	870,4	32,0%	Del FTI
							EFS/m2
							EFS/FTI
							EFS (público)/flujo público
							EFS (privado)/flujo privado
INTRUSA		Directa		<i>Público</i>			
15200	10400	68,4%		8640	83,1%	De la total C	
				<i>Particular</i>	1760	16,9%	De la total C
				<i>Público</i>	4000	83,3%	De la total R
				<i>Particular</i>	800	16,7%	De la total R
				Público	12640	83,2%	Del FTI
				Privado	2560	16,8%	Del FTI
							INTR/m2
							INTR /FTI
							INTR. (público)/flujo público
							INTR. (privado)/flujo privado
VÍA PÚBLICA		Directa		<i>Público</i>			
13056	10880	83,3%		9356,8	86,0%	De la total C	
				<i>Particular</i>	1523,2	14,0%	De la total C
				<i>Público</i>	1305,6	60,0%	De la total R
				<i>Particular</i>	870,4	40,0%	De la total R
				Público	10662,4	81,7%	Del FTI
				Privado	2393,6	18,3%	Del FTI
							VP/m2
							VP/FTI
							VP (público)/flujo público
							VP (privado)/flujo privado

La tabla anterior nos muestra la importancia de la aportación de diferentes tipos de alumbrado al flujo contaminante. En este caso, podemos ver que la EFS del alumbrado privado es un 32% del total, en su mayoría directa.

Con diferentes variaciones o controles de funcionamiento, tanto en cambios de luminarias como en control o reducción horaria, podemos obtener diferentes escenarios futuros y mejoras, que nos pueden servir para mejorar nuestra situación actual.



Consideraciones a propósito de RAMA-L:

Este método se basa en un análisis exhaustivo de los factores luminotécnicos, de actividad y entorno, y en un tratamiento informatizado de los datos de estudio. Con el análisis del *Grado Relativo de Emisión (GRE)* y de la *Emisión de Flujo Superior (EFS)*, pueden obtenerse resultados, ratios y comparaciones que permitan conocer si una instalación está bien diseñada, y qué potencial de mejora tiene; su objetivo es minimizar, en lo posible, el *impacto ambiental lumínico* que genera, sin perjudicar la actividad humana que se desarrolla en la zona.

Las aplicaciones analizadas hasta ahora van encaminadas a instalaciones simples o complejas: industrias, campos deportivos, alumbrado urbano... Pero pueden aplicarse igualmente en cualquier caso de estudio, puesto que la implantación de la metodología no significa un sobre coste significativo frente al estudio genérico de un proyecto o estudio ambiental estandarizado.

Las acciones orientadas a reducir el impacto ambiental de la CL suelen ir encaminadas a ofrecer una mayor calidad de servicio lumínico y una mayor adecuación a las necesidades del usuario, con lo cual también suelen ir acompañadas de una *recuperación de la inversión* que requieren, en un período corto o medio.

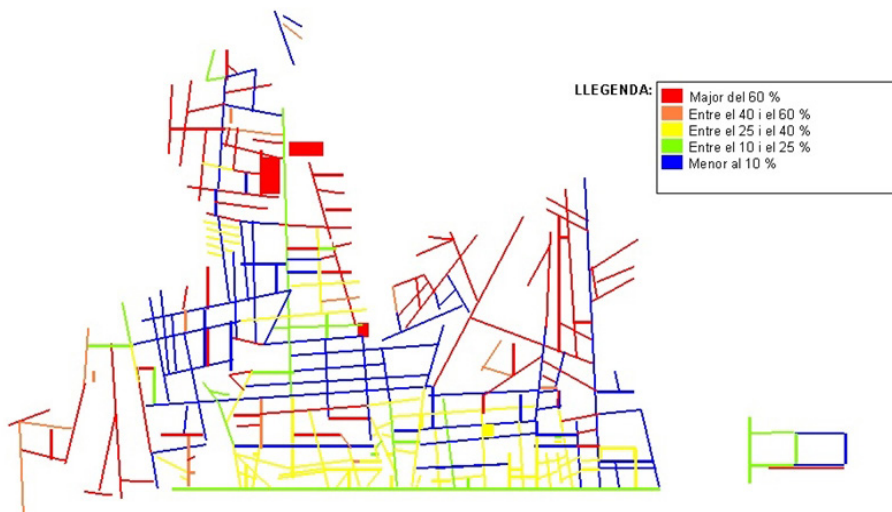
Este método puede desarrollarse en otros ámbitos de igual manera, pero a diferente escala o con otras aplicaciones:

- Ampliar la escala de análisis a macrozonas, como ciudades, municipios, polígonos industriales...
- Ampliar los factores de impacto ambiental de análisis: intensidad luminosa saliente en dirección y valor.

Ya se han realizado algunas experiencias a escala municipal (una población entera):

EFS por metro línea de vía pública.

Aplicación a una ciudad entera.





4.4. Modelización matemática de la CL según la influencia de los factores externos

En el apéndice sobre los efectos de la CL, se habla de la investigación que realizaron Elvey y Roach (1937) con el objetivo de determinar las condiciones del cielo nocturno utilizando un fotómetro fotoeléctrico. Se podría considerar que esta investigación es uno de los primeros modelos de análisis de la CL, debido a que tuvo que llevarse a cabo una metodología de análisis para la obtención de los datos y su tratamiento posterior.

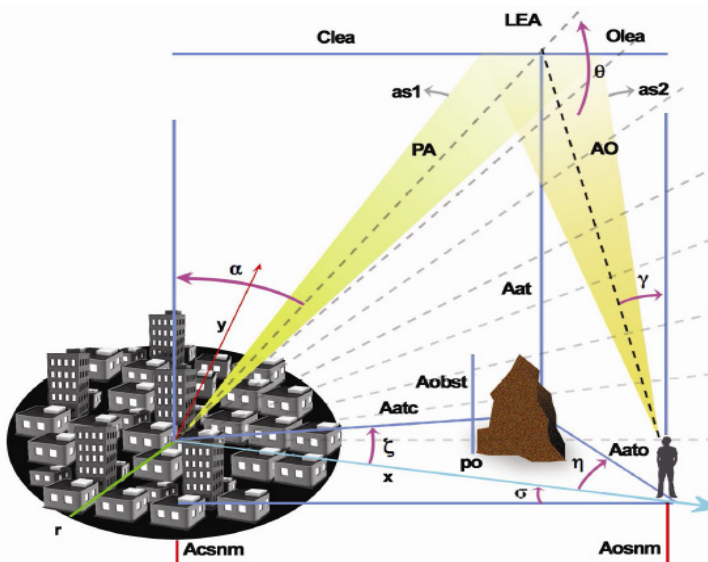
El presente modelo fue realizado como parte de una tesis doctoral presentada en la UPC por Héctor Antonio Solano Lamphar. En él se permite establecer una aproximación del grado de intensidad de luz, en cualquier punto de espacios afectados por la contaminación lumínica proveniente de los focos contaminantes cercanos. Los resultados se valorarán en luminancia de la bóveda celeste en Cd/m^2 o $Mag/arcseg^2$ - clase de medida utilizada ampliamente por los astrónomos-.

La propuesta fue desarrollada tomando en cuenta las metodologías similares ya existentes y los factores que influyen directamente en el aumento o disminución de la contaminación lumínica. Fue validada mediante recorridos de medición en diferentes espacios naturales y el contraste de los datos obtenidos.

Así pues el modelo funciona como herramienta de apoyo a investigaciones en la biodiversidad, y localización de puntos para observaciones astronómicas -amateur y profesional-, Estos podrán valorar el incremento de brillo del cielo nocturno en función de las instalaciones de alumbrado analizadas (foco contaminante).

Su explicación se realizará por partes –analizando cada una– y con la ayuda del esquema que se presenta a continuación.

Esquema del modelo completo





Se desarrolla la fórmula completa para una atmósfera sin condiciones adversas de clima, teniendo en cuenta tanto los factores que se irán exponiendo en el transcurso del mismo, como los principios de fotometría.

Si representamos la ciudad como un foco contaminante, asumimos que está compuesta por un sistema de iluminación artificial nocturna. Este sistema se puede contabilizar y, por tanto, obtener el flujo total instalado correspondiente al foco contaminante. Esta contabilización se puede llevar a cabo, de manera muy eficiente, por medio del método RAMA-L, que se ha explicado detalladamente en capítulos anteriores. Se realiza un modelado para determinar la afectación de las instalaciones de alumbrado artificial. La mayoría de los modelos analizados anteriormente sólo determinan una aproximación del flujo por cada habitante.

En el presente modelo, se toma el foco contaminante de manera puntual, escogiendo un punto central del cual parten dos ejes (x, y) y la circunferencia de radio r –que dependerá de las dimensiones de la ciudad. El hecho de tomar en consideración la ciudad como un área circular uniforme sobre un plano horizontal permite obtener mejores resultados para los observadores que se encuentran dentro de la ciudad.

Primero se contabiliza el flujo lumínico perteneciente a la ciudad, como lo hace el modelo RAMAL-L. Para el presente modelo, es necesario tomar uno de los indicadores utilizados en el modelo RAMA-L y caracterizarlo para obtener los datos necesarios en la fórmula. Tenemos un flujo lumínico dirigido que corresponde a la EFS partiendo de la ciudad hacia el primer ángulo sólido, que podemos denominar también *flujo luminoso* y que mide la energía global emitida por el foco contaminante. Por tanto, este flujo se representa:

$$Flha = AC \times EFS \times \text{Cos}\alpha \, d\Omega_1 \quad (1)$$

$$d\Omega_1 = \frac{ds_1}{pa^2} \quad (2)$$

$$ds_1 = dh * dv \quad (3)$$

donde:

$Flha$ = flujo lumínico hacia el ángulo sólido primario

Ac = área de la ciudad (tomando la fuente puntual, Ac siempre será igual a 1)

EFS = emisión de flujo superior

α = ángulo que se forma entre el cenit y la línea del flujo dirigido

$d\Omega_1$ = diferencial del ángulo sólido primario. El ángulo sólido que representa el

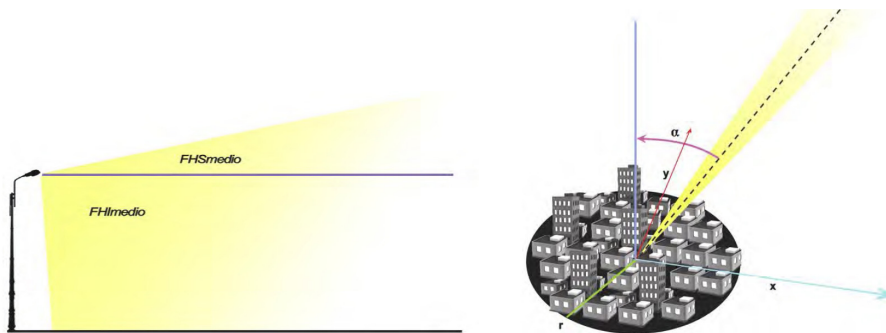


flujo lumínico que parte de la ciudad se denomina ángulo sólido primario. Éste ángulo tiene relación con el número de fotones que impactan en la atmósfera y la distancia entre dicha superficie y la ciudad, es decir, el flujo luminoso recibido por la atmósfera (Wolfram Research, 2010).

$dS1$ = superficie elemental del primer ángulo sólido

$dh * dv$ = lados de la superficie elemental de ángulo sólido, representados en la figura

pa = distancia entre el foco y el volumen donde impactan los fotones. La ley de la inversa del cuadrado o *ley cuadrática inversa* refiere a algunos fenómenos físicos cuya intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia al centro donde se originan. Como consecuencia de la propagación de la luz en línea recta, esta ley también se utiliza en la iluminación. Denominamos pa la distancia y, debido a la ley cuadrática inversa, esta pa se encuentra elevada a un cuadrado negativo.



Izquierda:
Explicación gráfica del FHS y el FHI (Solano, San Martín, García 2009)

Derecha:
Explicación gráfica del flujo dirigido (Solano, San Martín, García 2009)

Continuando con el modelo, tenemos el flujo luminoso para el primer ángulo sólido, ahora debemos determinar el comportamiento de la intensidad a través del volumen de ángulo sólido, tomando en cuenta la distancia y la extinción de la luz en ese paso. Por tanto:

$$Fllea = Ac \times EFS \times \cos \alpha \frac{dS1}{pa^2} C1 \tag{4}$$

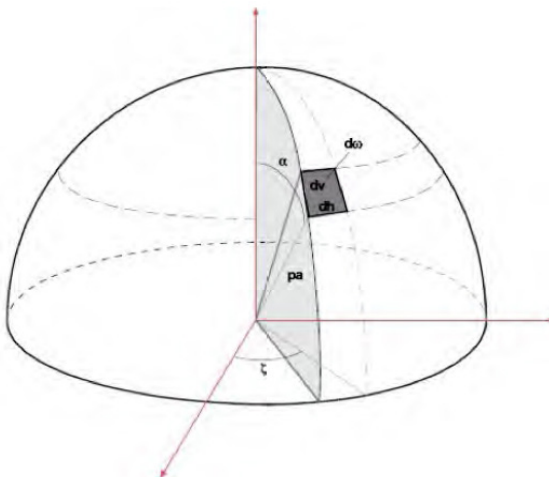
donde:

$Fllea$ = flujo lumínico hacia la atmósfera

$C1$ = primer coeficiente de transmisión



Representación gráfica del primer ángulo sólido (Solano, San Martín, García 2009)



Hasta este punto, se tiene el flujo luminoso por el primer ángulo sólido en relación con la distancia; por tanto, se deben determinar los fotones que pasarán de este ángulo sólido al segundo ángulo sólido en dirección al observador. La probabilidad de que ello suceda en una atmósfera compuesta por moléculas y aerosoles se verá a continuación.

Tomando en cuenta los factores anteriores:

$$Flho = Ac \times EFS \times \text{Cos}\alpha \frac{dS1}{\rho a^2} C1C2 \times Prob \times Aro d\Omega2 \quad (5)$$

donde:

Flho = flujo lumínico hacia observador

C2 = segundo coeficiente de transmisión

Prob = probabilidad de dispersión

Aro = área del observador

dΩ2 = diferencial de ángulo sólido secundario

El primer ángulo sólido es proporcional al segundo; la superficie elemental del primer ángulo sólido es proporcional a la diferencial de distancia del segundo (Kocifaj, 2007), por lo que la fórmula anterior pasa a ser:

$$Flho = Ac \times EFS \times \text{Cos}\alpha \times \rho a^{-2} \times C1C2 \rho a \times Prob \times Aro d\Omega2 \quad (6)$$



donde:

dao = diferencial de distancia entre el observador y el volumen donde impactan los fotones

Ahora, basándonos en la geometría del modelo propuesto, tenemos:

$$dao = \frac{dh}{\text{Cos}\gamma} \quad (7)$$

$$pa^{-2} = \frac{\text{Cos}^2\alpha}{Aat^2} \quad (8)$$

$$Flho = Ac \times EFS \times \text{Cos}^3\alpha \times Aat^{-2} \times C1C2 \, dAat \times \text{cos}^{-1}\gamma \times Prob \times Aro \, d\Omega2 \quad (9)$$

donde:

Aat = altura de atmósfera

$dAat$ = diferencial de altura de atmósfera. De esta manera, podremos integrar en una altura de atmósfera definida, basándonos en Kocifaj (2007).

Tomando en consideración otro principio de fotometría, tenemos que la intensidad luminosa recibida por el observador será proporcional al área del observador y al ángulo sólido secundario (ángulo de observación).

Por tanto:

$$IObs = \frac{Ac}{\text{Cos}\gamma} \times \frac{EFS \times \text{Cos}^3\alpha \times Aat^{-2} \times C1C2 \, dAat \times Prob \times Aro \, d\Omega2}{Aro \, d\Omega2} \quad (10)$$

donde:

$IObs$ = intensidad al observador

Eliminando términos similares y agregando la integración por altura de atmósfera, tenemos:

$$IO = \frac{Ac}{\text{Cos}\gamma} \int_0^{Aat} (EFS \times \text{Cos}^3\alpha \times Aat^{-2} \times C1C2 \times Prob) \, dAat \quad (11)$$

Y, agregando la corrección por obstáculo orográfico y la corrección por curvatura de la Tierra:

$$IO = CU \frac{Ac}{\text{Cos}\gamma} \int_{CO}^{Aat} (EFS \times \text{Cos}^3\alpha \times Aat^{-2} \times C1C2 \times Prob) \, dAat \quad (12)$$



donde:

CO = corrección por orografía

CU = corrección por curvatura de la Tierra

En el presente modelo, es posible delimitar la longitud de onda que está relacionada con la CL del caso de estudio, integrando definitivamente de acuerdo con la parte del espectro que se conozca de la luz proveniente del foco contaminante (Kocifaj, 2007). Por tanto:

$$IO = CU \frac{Ac}{Cos\gamma} \int_{CO}^{Aat} \left(Cos^3 \alpha \times Aat^{-2} \times \int_{\lambda 1}^{\lambda 2} (EFS \times C1C2 \times Prob) d\lambda \right) dAat \quad (13)$$

donde:

$\lambda 1$ = menor longitud de onda

$\lambda 2$ = mayor longitud de onda

La fórmula 40 corresponde al modelo propuesto para una atmósfera diáfana, sin tener en cuenta las condiciones adversas de climatología. Para convertirla a luminancia, hemos de conocer la superficie aparente perteneciente al volumen de atmósfera. Esta superficie, en metros cuadrados, nos dará la aproximación de la luminancia que afecta al observador. La superficie aparente dependerá de la distancia y del ángulo de observación. Así, también podremos convertir los valores de luminancia en mag/arcsec², con una conversión recomendada por Zotti (2007).

$$(Mag / Arcsec^2) = 12,603 \log_{10}(Cd / m^2) \quad (14)$$

Para un desarrollo en detalle del método, véase el apéndice correspondiente.

Ejemplo: Utilización del modelo en el caso de la depuradora de aguas residuales

Se realiza el desarrollo de un ejemplo con el objetivo de analizar el comportamiento del modelo en situaciones reales controladas. Imaginemos que se requiere conocer la influencia hacia un observador situado a 800 metros de distancia de la depuradora demostrada anteriormente. Tomando en cuenta atmósfera diáfana, con un ángulo cenital de observación de 1 grado y acimutal de 0 grados, con un ángulo de visión de 0,3 grados, sin obstáculos orográficos

Observando el desarrollo completo:

$$IO = CU \frac{Ac}{Cos\gamma} \int_{CO}^{Aat} \left(Cos^3 \alpha \times Aat^{-2} \times \int_{\lambda 1}^{\lambda 2} (EFS \times C1C2 \times Prob) d\lambda \right) dAat \quad (15)$$



Primero es necesario definir cada uno de los aspectos que forman parte del modelo y que caracterizan la situación de la depuradora de aguas residuales. Se ha utilizado el software informático Wolfram para los cálculos.

CU = corrección por curvatura de la Tierra

Recordando la fórmula de curvatura de la tierra:

$$CU = Exp^{-h/A}$$

$$h = PO \times (1,57 \times 10^{-4} Km)$$

Por lo tanto $CU = 0,9999999686$

Ac = Área del foco contaminante (en este caso al tratar con un observador fuera del foco, tomaremos el foco puntual)

Por lo tanto $Ac = 1$

Co = Corrección por orografía (en este caso no se encuentran obstáculos orográficos).

Por lo tanto $Co = 0$

α = ángulo cenital del foco contaminante

$$\alpha = ArcCos\left(\left(1 + Tan^2\gamma\right) + \frac{po}{Aat} \times \left(\frac{po}{Aat} - 2Tan\gamma \times \cos\eta\right)\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (18)$$

$\alpha = 4,0898$ grados

Aat = Altura efectiva de atmósfera

$Aat = 9,996$

Se tomarán las longitudes de onda estándar para la luz visible (entre 380 nm y 780 nm)

$EFS = 946916$

(dato del ejemplo RAMA-L extraído en el proceso anterior a obtener el GRE)

CT = Coeficiente de transmisión

$$C1 = exp^{-X1(Ka+Km)PA}$$

$$C2 = exp^{-X2(Ka+Km)AO}$$

$C1 = 0,88835$



$$C2 = 0,886$$

Prob = Probabilidad de dispersión

$$Prob = \frac{1}{4\pi} FF(1,2)D \quad (19)$$

$$Prob = 0,014035$$

En este punto se tienen todos los coeficientes requeridos

Utilizando la fórmula:

$$IO = CU \frac{Ac}{Cos\gamma} \int_{co}^{Aat} \left(Cos^3\alpha \times Aat^{-2} \times \int_{\lambda 1}^{\lambda 2} (EFS \times C1 C2 \times Prob) d\lambda \right) dAat \quad (20)$$

Computando los datos en la fórmula principal con el software Wolfram, tenemos que:

$$IO = 0,01145$$

Tomando en cuenta la superficie aparente y el ángulo de visión tenemos:

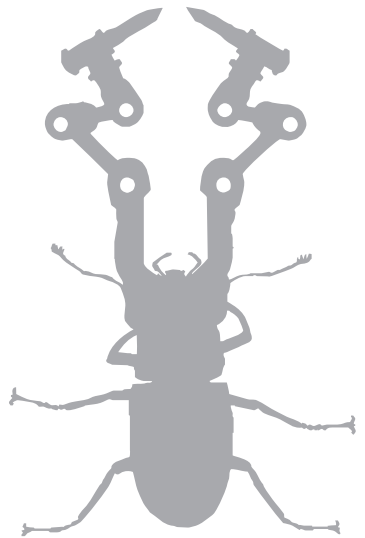
$$CL = 0,0008312 \text{ cd/m}^2$$

Y utilizando la formula de conversión

$$\left(Mag / Arcsec^2 \right) = 12,603 \log_{10} \left(Cd / m^2 \right) \quad (21)$$

$$CL = 20,3036 \text{ mag/arcsec}^2$$

El resultado final equivale al brillo del cielo, proveniente de la depuradora de aguas residuales, hacia un observador situado a 800 metros que se encuentra observando en dirección hacia el foco con un ángulo de elevación de 89 grados. Cabe mencionar que los astrónomos consideran oscuridad total a 21,6 mag/arcsec².







Apéndice 1.

Proceso de investigación en los efectos de la CL

Este capítulo, que trata de los efectos de la CL, constituye una disertación basada en una exploración bibliográfica al respecto del problema. Se divide en cinco secciones principales. Se inicia con el efecto que produce la CL en las observaciones astronómicas y, a continuación, se trata del efecto en los seres humanos, así como de la influencia que ejerce sobre la variación de las condiciones nocturnas en los espacios naturales. Posteriormente, se tratan los aspectos socioeconómicos y se concluye con una exploración orientada a diferentes efectos aislados o que no han sido tratados con tanto rigor como los anteriores.

El efecto de la CL en la astronomía

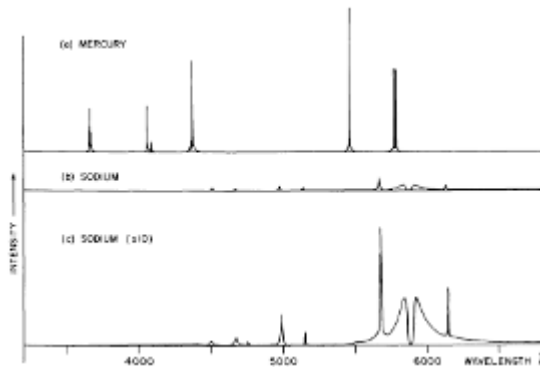
Los investigadores astrofísicos fueron los primeros en abordar y analizar el problema de la CL. El molesto brillo que la iluminación artificial generaba sobre las ciudades y sus alrededores impedía la observación correcta de los astros. Por ello, decidieron unir esfuerzos para analizarlo y proponer opciones de mejora. Ese brillo les molestaba principalmente en los aspectos relacionados a la visión, de modo que los satélites que funcionan como observatorios fuera de la atmósfera terrestre no se ven afectados por este problema.

Si bien es cierto que el fenómeno empezó a analizarse con mayor interés a partir de los años setenta del siglo xx, se tiene conocimiento de investigadores anteriores que ya se interesaban por esa aurora que se veía por encima de las ciudades. En 1937, los astrónomos Elvey y Roach realizaron una interesante investigación con el objetivo de analizar las variaciones de luminancia que se experimentaban en el cielo nocturno. Para ello, utilizaron un fotómetro fotoeléctrico y obtuvieron mediciones de diferentes horas de la noche y en diferentes temporadas. Esas mediciones se trataron y compararon, y se llegó a la conclusión de que la CL crecía a medida que la población se incrementaba. No se tienen antecedentes de otra investigación similar hasta tres décadas más tarde. Una de las primeras



investigaciones modernas fue la realizada por Hoag (1972), que hablaba del efecto de las luces de las ciudades en las observaciones astronómicas. Otra similar fue llevada a cabo por Riegel (1973), quien expuso un problema que estaba creciendo rápidamente y proporcionaba los primeros consejos de caracterización. Asimismo, los astrónomos señalaban que no todas las lámparas les afectaban del mismo modo. Cada tipo de lámpara tiene una disposición espectral específica y, además, la longitud de onda también es diferente. Así se expuso en una investigación realizada por Fletcher y Crampton (1973), en la que compararon las lámparas de vapor de sodio con las de mercurio. Se estableció que las lámparas de vapor de sodio resultaban menos contaminantes.

Comparación de la distribución espectral en las lámparas de mercurio y de sodio (Fletcher y Crampton, 1973).



Además de los estudios de monitoreo y análisis, los astrónomos se interesaban por determinar las condiciones de determinados sitios más propicios, por lo que también se realizaron investigaciones dirigidas a crear modelos astrofísicos para resolver el problema. Walker (1970, 1977b) fue uno de los primeros astrónomos en llevar a cabo estudios de CL en este sentido; posteriormente, se dedicaría a la caracterización de la CL de observatorios específicos y a la identificación de sitios potenciales para la ubicación de observatorios (Walker, 1976, 1977a, 1984) (Walker y Cayrel, 1979). Destaca el estudio que realizó en el observatorio del Monte Hamilton, en el que se determinó el incremento de la CL por los asentamientos de San José y del Valle de Santa Clara (Osterbrock, Walker y Koski, 1976). Anteriormente, habían participado otros investigadores, como Kalinowski, Roosen y Brandt (1975), que determinaron la cantidad de brillo nocturno del observatorio de McDonald utilizando mediciones realizadas con fotómetros fotoeléctricos. Posteriormente, Hoag (1976) realizó un monitoreo fotográfico de la CL que afectaba el Observatorio Nacional de Kitt Peak. De esta investigación surgió uno de los primeros mapas nocturnos que se conocen.

Uno de los primeros mapas luminicos que se conocen, en este caso de los Estados Unidos, elaborado por Hoag (1976).





Walker (1979), con la ayuda de Cayrel (1979), presentó un artículo en el que se identificaban algunos observatorios astronómicos existentes a proteger y se proponían otros potenciales en Estados Unidos. Se constituyó una comisión encargada de identificar estos lugares y se propusieron estrategias de preservación. Dicha comisión estaría constituida por investigadores, por miembros de los observatorios astronómicos del país y por representantes nacionales. Ese mismo año, Schneeberger, Worden y Beckers (1979) publicaron un estudio realizado en el Observatorio Peak en el que determinaban las condiciones de CL que presentaba. Se indicaban los resultados en arcosegundos (arcsec), medida de visión astronómica. Posteriormente, se llevarían a cabo nuevas identificaciones de observatorios astronómicos existentes a proteger (Smith, 1982a, 1982b; Van der Bergh, 1987, 1988).

Años después, vinieron las aportaciones de Garstang (1984). Principalmente, sus estudios se centran en la medición de la iluminación artificial producida por las ciudades de noche. En su primer estudio, llevado a cabo en 1984, proponía mejorar las fórmulas de Treanor (1976) y Berry (1976). Posteriormente, investigó las magnitudes límite de visibilidad de las estrellas con luz de día (Garstang, 1985b) y, en otro estudio, el brillo del cielo nocturno en la ciudad de Denver en comparación con luna llena (Garstang, 1985a). Y un año más tarde publicó la que sería, acaso, su aportación más importante a la comprensión del fenómeno de la CL: el modelo para la iluminación artificial de noche (Garstang, 1984, 1986).

Hasta el momento, las investigaciones se centraban sólo en las observaciones astronómicas en el espectro visible (Louistisserand *et al.*, 1988), que utilizaban un espectrógrafo para caracterizar el espectro óptico del cielo nocturno en observatorios de grandes altitudes. Sin embargo, en 1988, Lindley realizó un análisis del efecto de la CL en la radioastronomía. Los radiotelescopios llevan a cabo los análisis captando ondas de radio, por lo general a través de una antena parabólica o de conjunto de ellas, procesando las ondas para generar esquemas e imágenes. Al respecto, Lindley (1988) argumentaba que, aunque los esfuerzos en ese campo eran menores, la solución debería ser la misma que para los observatorios astronómicos de espectro visible. Por su parte, Garstang (1988) realizó un estudio para obtener un modelo que predijera la CL y sus variaciones estacionales. Lo que hizo fue introducir un nuevo modelo de tratamiento de la atmósfera que tomaba en consideración la extinción por aerosoles y por moléculas, incluso polvo y vapor de agua, aunque cada uno con su respectiva escala de alturas.

En los años sucesivos, aparecieron las investigaciones de Crawford (1990), que describió los problemas de visión a los que se enfrentaban los astrónomos por el crecimiento de la CL y dio algunas recomendaciones examinando las diferentes fuentes de luz. Aquel mismo año, Massey, Gronwall y Pilachowski (1990) utilizaron espectrofotometría para analizar la noche en el Observatorio Nacional de Kitt Peak, dividiendo la información en función de la contribución de los distintos componentes atmosféricos a la visibilidad.

En 1991, se llevó a cabo un análisis del crecimiento de la población en el sur de California y su efecto en el entorno del observatorio de Monte Palomar. En él, se proponían una serie de consejos a tener en cuenta para evitar que la CL afectara las observaciones, dividiendo los tipos de CL y las fuentes de donde provenía (Brucato, 1991).



Efecto de la CL en el observatorio de Monte Palomar (Caltech, 2009).



Los astrónomos aficionados, igualmente afectados por la CL, también manifiestan su preocupación al respecto. Una investigación importante a cargo de astrónomos amateurs fue impulsada por el Museo Nacional del Aire y del Espacio de Washington en 1991. La investigación puso de manifiesto un cambio de hábitos, que se reflejaba en los instrumentos que los astrónomos amateurs debían usar y en que la búsqueda de los mejores lugares oscuros propicios para las observaciones se tomaba como pasatiempo (Chester, 1991). En ese mismo año, se publicó un artículo sobre los tres observatorios de México y los problemas de contaminación que padecían. La investigación fue a cargo de Costero (1991), que estudió cada uno de los observatorios, indicando las características de los telescopios y de los instrumentos que los conformaban, y determinó los pueblos cercanos o los focos de contaminación que pudieran estarles afectando. También en 1991, Jiang hizo un compendio de las condiciones medioambientales que rodeaban los observatorios en China, entre ellas la CL. Concluyó que la contaminación atmosférica acrecentaba la lumínica en muchos observatorios del país y recomendó hacer la caracterización de la meseta tibetana, mucho menos poblada, como opción futura para la localización de observatorios astronómicos.

Garstang (1991), que seguía participando denodadamente en el estudio del problema, ofreció un compendio de los modelos existentes hasta la fecha, incluyendo las aplicaciones prácticas que cada uno de ellos. Por su parte, Sperling (1991), en su disertación sobre astronomía titulada “La desaparición de la oscuridad”, formuló algunas recomendaciones para el diseño de una nueva luminaria que permitiera menos desperdicio de luz y menos CL. En 1992, Murdin desarrolló una investigación en los Estados Unidos para determinar las ordenanzas y los reglamentos que abordaban la protección de los observatorios en el país. No sólo se centró en los observatorios ópticos, sino también los radiotelescopios, aunque concluyó que el esfuerzo debería ser mayor en el aspecto óptico, puesto que las ondas de radios aún no estaban totalmente legisladas (Murdin, 1992).

Posteriormente, en 1993, Bruni, un astrónomo amateur, determinó que la visibilidad de la nebulosa de Orión (M42) estaba siendo seriamente afectada si se comparaban fotografías tomadas en diferentes sectores de los Estados Unidos con presencia de CL. También observó que algunos filtros podían bloquear las emisiones de algunas longitudes de onda de lámparas de mercurio y vapor de sodio. Sin embargo, en su estudio también señalaba que los filtros eran caros y, por tanto, que muchos astrónomos se veían afectados por no tener la posibilidad de adquirirlos. En esa época, la mayoría de los reglamentos y de las ordenanzas se centraban solamente en los observatorios profesionales (Schreuder, 1991).



Posteriormente, Murdin (1994) expondría unas razones más teóricas y filosóficas de por qué la astronomía debía protegerse. La astronomía es un esfuerzo intelectual humano que nos acompaña desde la historia de la civilización, nos ayuda a entender los orígenes del universo y, desafortunadamente, está siendo extinguida por la propia civilización (Murdin, 1994).

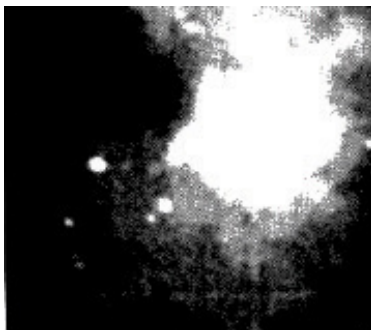


Imagen de la nebulosa de Orión (M42), utilizada por Bruni (1993).

El hecho de que la CL estuviera afectando cada vez más las observaciones astronómicas motivaba nuevos esfuerzos orientados a comprender mejor este fenómeno y a disminuir sus efectos. Algunos astrónomos llegaron al punto de buscar disminuirla con el apagado de las lámparas de iluminación artificial pública. Cordell (1993) proponía adquirir una especie de láser que incidiera en los sensores de las lámparas y, de esta manera, conseguir su apagado. El láser mencionado cumplía el efecto de día y, por tanto, lograba que la lámpara se apagara. Aunque parecía una opción muy simple, el artículo fue publicado en la prestigiosa *I.A.P.P.P. Communications*.

En 1994, prosiguiendo los estudios sobre la CL y sus efectos en la astronomía, Blanco (1994) realizó una serie de propuestas para que los gobiernos las tomaran en cuenta. Dichas propuestas se orientaban a la promoción, la dirección, el asesoramiento y la planificación de los estándares de instalación y de uso de plantas de iluminación pública y privada, dentro del territorio nacional de Italia. También se proponía establecer una estrecha relación entre las comisiones gubernamentales de electricidad y gestión de la energía, y las sociedades astronómicas del país. Un estudio similar se llevó a cabo dos años más tarde, en Edimburgo, el denominado "Plan de iluminación de Edimburgo". En éste, también se proponía mantener una relación estrecha entre las asociaciones gubernamentales y los astrónomos, con el objetivo de mejorar el problema de la CL y su efecto en la astronomía (Brennan, 1994). Otra importante contribución fue la de Mattila, Väsänen y Appen-Schnur (1996), que llevaron a cabo un conteo del brillo del cielo en el área de la Silla, en Chile, donde se localizan un gran número de observatorios operados por el Observatorio Europeo del Sur (ESO).

Años después, en 1998, Carrasco, Carraminana, Sánchez-Sesma y Lermo (1998) realizaron una investigación al norte de México, en el observatorio de Guillermo Haro, en el Estado de Sonora. Dicha región carece de normas que regulen los observatorios astronómicos, por lo que el estudio recoge una serie de sugerencias para el lugar específico y propone trabajar conjuntamente con el Instituto Nacional de Ecología para tratar de mejorar el medio ambiente del observatorio.



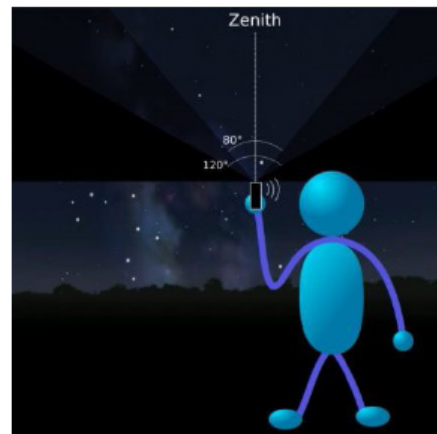
Aquel mismo año, Baruch (1998) publicó un artículo con el fin de aconsejar sobre cómo preservar las ventanas astronómicas. En su análisis, asociaba el crecimiento de los estándares de vida y de la población con la CL. Comentaba que el cielo nocturno es patrimonio de la humanidad y que los telescopios robóticos, que están disponibles en distintas páginas de Internet, pueden ayudar a que más personas se interesen por las observaciones astronómicas y comprendan la importancia de preservar el patrimonio del cielo nocturno. Percy (1998) también estudió las ventanas astronómicas con el objetivo de educar a la sociedad en la comprensión del efecto de la CL.

Por su parte, Green (1998) realizó una interesante disertación para la revista *Sky & Telescope* sobre por qué la CL afecta a los astrónomos. Hoy en día, su artículo aún se sigue publicando en revistas de interés general, debido a que es una explicación sencilla y clara del efecto de la iluminación artificial nocturna en las observaciones astronómicas. Una investigación parecida fue realizada por Kovalevsky (1998), que determinó, de una manera más técnica, los efectos del medio ambiente en las observaciones astronómicas, incluyendo la masa de aire, el componente atmosférico y, por supuesto, la CL.

Garstang (2001, 2006) continuó realizando investigaciones sobre la CL y su medición. Los últimos artículos que publicó se centraban en la determinación del aumento del brillo nocturno causado por las nubes. Tomó el modelo que había desarrollado en 1986 y lo modificó para determinar la CL en el cenit, con el observador en el centro de la ciudad. Para analizar la contribución de las nubes a la CL, se basó en el modelo de Wiscombe, asumiendo que la nube representa una capa horizontal uniforme. Por desgracia, algunos de sus estudios quedaron inconclusos, puesto que Garstang falleció en noviembre de 2009.

A raíz de que la CL afectaba cada vez a más personas, se desarrolló un instrumento económico y fácil de usar, que permitía encontrar los mejores lugares de observación. El Sky Quality Meter (SQM) de Unihedron es un fotómetro manual que permite a los observadores cuantificar el brillo del cielo. Con un diseño compacto y portátil, este equipo permite cuantificar fácilmente la calidad del cielo nocturno (Unihedron, 2007).

El SQM y sus instrucciones de uso (Unihedron, 2007).





Efectos de la CL en los seres humanos

Se podría pensar que los efectos de la CL en el ser humano tienen que ver con la visión y la percepción visual, debido a que el problema tiene su origen en la iluminación artificial. A pesar de que muchos efectos guardan relación, también está estudiado que la iluminación artificial puede ser percibida con los ojos cerrados y, dependiendo de dicha percepción, variará la cantidad de melatonina – hormona producida en la glándula pineal y que regula los ciclos circadianos– que el cuerpo genere. Por tanto, la CL afecta la cronobiología de los seres humanos y puede ocasionar desórdenes en el sueño y en las regulaciones biológicas, como el metabolismo energético necesario para las funciones que producen energía en el cuerpo. Este es sólo un ejemplo, puesto que los ritmos circadianos afectados inciden en el correcto balance hormonal y producen una alteración en la producción de melatonina, lo que podría causar afectaciones más graves a largo plazo –como diferentes tipos de cáncer. A corto plazo, la CL en los seres humanos produce efectos que acaso no percibimos porque podríamos creer que están siendo ocasionados por otros problemas. Así, se producen alteraciones en la psicofisiología humana, lo que hace que, directa e indirectamente, se experimenten cambios de comportamiento que desembocan en depresión, diferentes casos de insomnio y ansiedad, e incluso alteraciones en la visión. En los párrafos siguientes, se analizan científicamente los efectos mencionados.

Entre los principales, destaca que la CL muchas veces genera un problema llamado *luz intrusa*. La luz intrusa es aquella que se introduce en el hogar, principalmente por las ventanas, procedente de la iluminación artificial, por lo general pública. Ese brillo molesto es el responsable de tener que bajar la persiana y muchas veces no deja dormir adecuadamente. En 1995, se realizó una investigación acerca de las molestias que la CL ocasionaba en las personas holandesas –propiamente, el estudio abordaba varias molestias y, entre ellas, la iluminación artificial. Para ello, se tomaron 4.000 personas representativas de la población de Holanda. Se realizaron cuestionarios a dichas personas, relacionados con el ruido, las vibraciones y las instalaciones de iluminación artificial que afectaban el buen desarrollo de sus actividades diarias. Sólo un 4% de la población señaló molestias con la iluminación artificial en aquel momento (Anon, 1995).

Posteriormente, al año siguiente, se analizaron los efectos que estaban causando los invernaderos en los habitantes de una pequeña población situada cerca de los invernaderos. No fueron considerados los efectos fisiológicos, pero sí se efectuaron encuestas al respecto a sus habitantes, que, por medio de datos estadísticos, se relacionaron con la exposición a la CL y el nivel de CL proveniente de los invernaderos. Van Bergem-Jansen y Vos (1996) llevaron a cabo un importante estudio para analizar en qué medida una cancha de tenis molestaba a los habitantes de los alrededores.

Aunque no se sabe a ciencia cierta, al parecer los seres humanos también tienen el riesgo de contraer diferentes tipos de enfermedad por la exposición a la CL, como señalaron Davis, Mirick y Stevens (2001). Dichos investigadores realizaron un trabajo para demostrar que la exposición a la luz por la noche se puede asociar al riesgo de desarrollar cáncer de pecho. Lograron demostrar, después de estudiar a varias personas, que la exposición a la luz por la noche puede aumentar el riesgo del cáncer de pecho al suprimir la producción nocturna normal de me-



latonina en la glándula pineal, que, por otra parte, podría aumentar el estrógeno en los ovarios.

Ejemplo de luz intrusa y su solución (RASC, 2009).

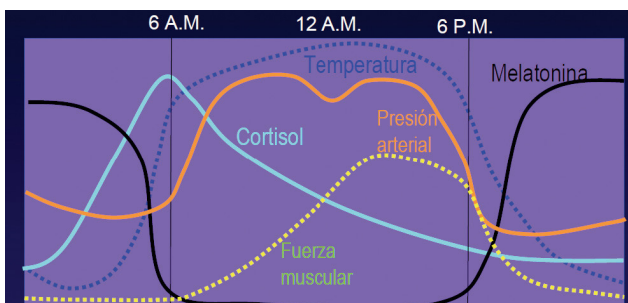


Aquel mismo año, Schernhammer *et al.* (2001) realizaron una investigación para demostrar que el trabajo de noche reduce la producción de melatonina. Para ello, tomaron como voluntarias a enfermeras que trabajaban en horario nocturno. Se centraron en el cáncer de pecho y demostraron que las mujeres que trabajaban en turnos de noche y que rotaban por lo menos tres noches por mes tenían un riesgo moderado al cáncer de pecho, después de largos períodos de trabajo en turnos de noche.

Además de la luz intrusa y sus efectos en el desarrollo del cáncer o la supresión de la melatonina, la CL también puede ser responsable del desarrollo de la miopía. Así fue expuesto en una investigación desarrollada en la Universidad de Pensilvania, en la que se evaluaron 500 niños un porcentaje de los cuales dormía en completa oscuridad, mientras que otro lo hacían con la lámpara prendida y, finalmente, un tercer grupo, con todas las luces de la habitación encendidas. Se observó que más del 50% de los niños que dormían con las luces encendidas padecían miopía (Anon, 1999).

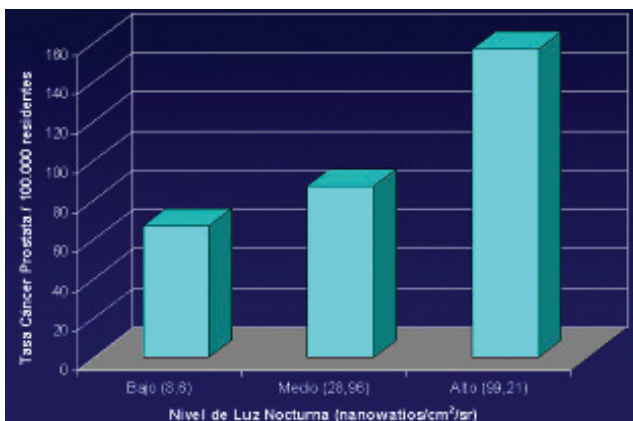
Pukkala *et al.* (2006) analizaron cómo afectaba la reducción de melatonina en la formación de cáncer en los humanos. De hecho, algunos de los resultados obtenidos establecen que la melatonina actúa como antioxidante y se observó que las personas ciegas presentan mayor cantidad de melatonina y, por tanto, menos riesgo de padecer cáncer. Analizaron a varias personas durante unos años y concluyeron que el riesgo de cáncer de mama disminuía considerablemente en las mujeres analizadas, aunque no se obtuvo el mismo resultado con el cáncer de próstata en los varones estudiados.

En 2009, se realizaron dos importantes contribuciones en la localidad de Murcia acerca de la CL y sus efectos en los seres humanos. Madrid (2009) y Rol de Lama y Madrid (2009) investigaron sobre la cronodisrupción –pérdida del orden temporal interno experimentada por personas expuestas a la luz nocturna brillante, que puede acarrear consecuencias que van desde trastornos del sueño hasta cáncer en diferentes partes del cuerpo.



Los ritmos biológicos a diferentes horas del día (Madrid, 2009).

Completaron su trabajo contabilizando diferentes tipos de cáncer en algunos países y relacionándolos con el índice de CL en los mismos.



Correlación entre el cáncer de próstata y la luz nocturna (Madrid, 2009).

Efectos de la CL en la biodiversidad

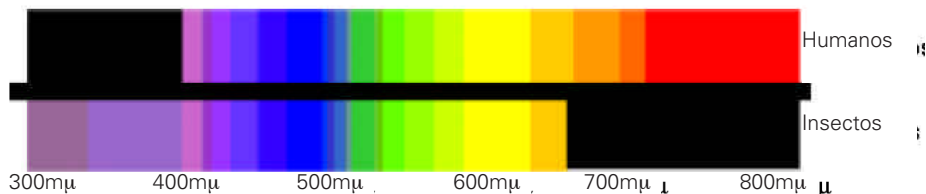
En los apartados anteriores, se ha podido observar que el problema de la CL fue descubierto cuando, debido a un exceso de luz artificial enviada hacia la bóveda celeste, era difícil realizar las observaciones astronómicas habituales. Por tanto, fueron los astrónomos los primeros investigadores en percatarse de este grave problema. Posteriormente, numerosos científicos unieron esfuerzos para determinar el efecto de la CL en la variación de las condiciones nocturnas en los espacios naturales. Ha habido investigaciones relevantes sobre CL y su relación en la variación de las condiciones nocturnas de los espacios naturales, realizadas principalmente por biólogos; sin embargo, estos estudios aparecen años después de las investigaciones llevadas a cabo por los astrónomos. Al respecto, no se puede dejar de mencionar, de nuevo, la Asociación Internacional para el Cielo Oscuro, creada en 1988 por astrónomos que se veían afectados en sus obser-



vaciones nocturnas. Últimamente, también han surgido nuevas inquietudes en la organización; por ejemplo, la incidencia de la CL en los animales nocturnos. La actividad principal de la Asociación Internacional para el Cielo Oscuro es promover el uso correcto de la iluminación artificial, es decir, poco o nada de luz hacia arriba en áreas públicas, y, en general, motivar a las comunidades para que adopten regulaciones con relación a la iluminación. Los efectos de la CL sobre la biodiversidad son variados, pues inciden en las plantas y en los animales de costumbres nocturnas y afectan, en gran medida, a la cadena alimenticia y otros tipos de relaciones ecológicas. Dichos efectos incluyen problemas en la depredación, la declinación de los polinizadores nocturnos, la imposibilidad de orientación que afecta la comunicación y la migración, efectos en la cronoecología, eso es, en los ritmos ecológicos –incluyendo plantas y animales–, e incluso se comenta que detiene la correcta evolución de algunas especies y la diversidad de las mismas. La CL también afecta la cadena trófica y la aptitud de muchas plantas y animales. Y ello también incide, de manera directa o indirecta, en los seres humanos, como se verá en los párrafos siguientes.

En 1998, se publicó en España un artículo titulado “La problemática de la CL en la conservación de la biodiversidad”, de Dolsa y Albarrán (1998), que han sido los científicos entomólogos que más han estudiado el efecto de la iluminación artificial nocturna en la biodiversidad y, principalmente, en los insectos –su rama de especialidad. En el artículo mencionado, se explica cómo la iluminación artificial está afectando muchos animales terrestres en Cataluña; se mencionan algunos insectos, lepidópteros y aves, y se indica la parte del espectro electromagnético que más les afecta.

Comparación de la sensibilidad en el espectro visible de los humanos y de los insectos (Dolsa y Albarrán, 1998).



En Francia, la preocupación por este fenómeno quedó manifestada en el deseo de estudiar la afectación de la CL en la flora y en la fauna nocturna. Raavel y Lamiot (1998) realizaron un compendio de la afectación de la iluminación artificial nocturna en diferentes especies de su país. Se centraron en describir los efectos sobre anfibios, anguilas, peces y pájaros.

Bruderer, Dieter y Steuri (1999) demostraron que las aves se ven muy afectadas por la CL al toparse con la barrera visual que la iluminación artificial origina. En su investigación, analizaron el comportamiento de las aves migratorias expuestas a un radar en banda x y a un haz luminoso brillante. Comprobaron que, al toparse con el resplandor de la barrera de luz, las aves sufrían variaciones en su trayectoria y en la velocidad de desplazamiento.

También se ha demostrado que la CL no sólo afecta la biodiversidad terrestre, sino que también perturba, de manera negativa, muchas especies marinas. Se han llevado a cabo estudios interesantes en especies marinas que realizan diariamente migraciones verticales –un tipo de migración que realizan algunos



organismos que habitan en zonas fóticas del océano. Gal *et al.* (1999) desarrollaron un estudio de la cantidad de luminosidad ambiental que debería tener el crustáceo *Mysis relicta* para llevar a cabo la migración diaria. Con un exceso de iluminación, se causaría un desequilibrio en el proceso de migración (Gal *et al.*, 1999). Esto también ha sido comprobado en otras especies, mediante una investigación realizada por Moore *et al.* (2000). Con este trabajo, se demostró que la CL urbana altera la migración vertical diaria de los *Daphnia* –crustáceos de pequeño tamaño, conocidos como “pulgas de agua”. Se demostró que la CL no sólo sirve como la señal próxima que acciona la subida del zooplancton, sino que también reduce la amplitud de migración si los niveles son suficientemente altos por la noche. Por ejemplo, la luz de una luna llena reduce la amplitud de los *Daphnia*, por lo que es de suponer que luces más intensas provocan desequilibrios en los desarrollos naturales de la especie mencionada. Se demostraron las hipótesis de que la CL asociada a áreas urbanas reduce la amplitud y la magnitud de migración del zooplancton (Moore *et al.*, 2000).

Posteriormente, se divulgaron nuevos conocimientos de igual o mayor importancia. Es el caso, por ejemplo, los congresos donde se exponen temas relativos a la afectación de la CL en la biodiversidad. El primer simposio, con el lema “Ecology of the Night”, se llevó a cabo del 22 al 24 de septiembre de 2003 en el Leslie M. Frost Natural Resources Centre de Dorset, Ontario. En él, se trató de la importancia de preservar el medio nocturno natural tomando las medidas necesarias, como la buena gestión del alumbrado artificial. También se abordaron temas relacionados con el interés que ha despertado, en biólogos de todo el mundo, la afectación de la CL a la biodiversidad, ya que los investigadores están observando el grave desequilibrio que genera. En dicho congreso, también se empleó, por primera vez, la palabra *escotobiología* para designar “el estudio de la oscuridad como soporte de vida”.

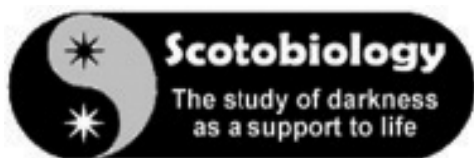


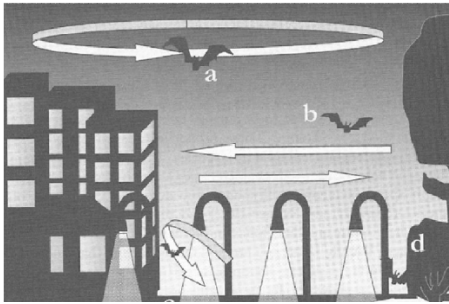
Imagen de la campaña para dar a conocer la palabra *escotobiología* (Muskoka Heritage Foundation, 2008).

Aquel mismo año, se hizo pública otra investigación sobre la biodiversidad y la CL. Bird, Branch y Millar (2003) estudiaron los efectos de la iluminación costera en el comportamiento alimentario de los ratones de playa. Se observó que los ratones tenían una gran dificultad para conseguir forraje en condiciones lumínicas adversas. El estudio se centró en el efecto que podían causar las lámparas de vapor de sodio a baja presión ya que, por lo general, se usa este tipo de lámparas para impedir la afectación de la CL en tortugas e insectos. Los resultados demostraron que la luz artificial afecta el comportamiento de las especies terrestres en áreas costeras y que la polución por luz merece una mayor consideración en la planificación de la conservación. Cada vez se realizaron más investigaciones centradas en especies específicas. En 2004, Longcore y Rich publicaron un artículo titulado “Ecological Light Pollution”, en el que describían, de manera general, el problema que supone no controlar la iluminación artificial nocturna. Posteriormente, este texto sería la introducción de un libro que publicarían los mismos autores en 2006.

Es sobradamente conocido que es frecuente el comportamiento nocturno en las ranas. Baker y Richardson (2006) publicaron un artículo sobre estos anfibios, en el que presentaban una investigación que habían realizado con el objetivo de comprobar el efecto de la luz artificial en el comportamiento masculino de las ranas verdes. Los resultados demostraron claramente que el comportamiento de la rana verde masculina se ve afectado por la presencia de la luz artificial. Debido a ello, existe un alto potencial de afectar la reproducción de la especie, y consecuentemente reducir su población. Rich y Longcore (2006), que, por cierto, son dos de los investigadores que más se han preocupado por el efecto de la CL en la biodiversidad, publican en 2006 una recopilación de investigaciones acerca de las consecuencias ecológicas de la iluminación artificial nocturna, especialmente de los efectos de la luz artificial nocturna en los mamíferos terrestres. Los artículos divulgados en dicho libro han sido de suma importancia para los biólogos y los investigadores interesados en el problema. Así, Beier (2006) explica que existen numerosos mamíferos de costumbres nocturnas que se ven seriamente afectados por el exceso de luz, y trata temas de anatomía, sociología y comportamiento ante este tipo de situaciones.

Por su parte, Rydell (2006) demuestra que los murciélagos tienen que modificar sus hábitos para poder encontrar los insectos que les sirven de alimento. Explica cómo los murciélagos se aprovechan de la atracción que sienten los insectos por la iluminación artificial, que les lleva a dirigirse hacia las luminarias y allí conseguir su alimento. De esta manera se expone el desequilibrio que la CL está generando en las poblaciones de insectos y murciélagos, así como el cambio de hábitos que han de realizar para adaptarse a tales circunstancias.

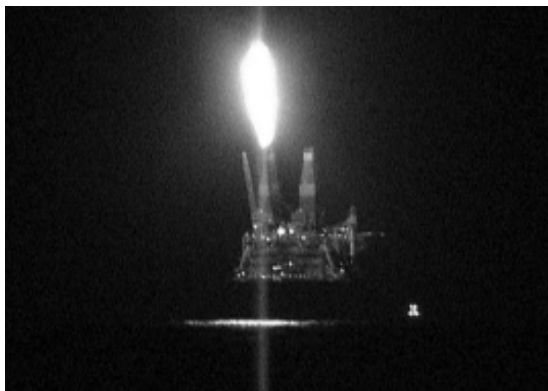
El efecto de la CL en los murciélagos (Rydell, 2006).



Como ya se ha expuesto, también las aves se ven afectadas por el problema. Gauthreaux Jr. y Belser (2006) lo corroboran con una investigación sobre los efectos de la luz artificial en la migración de aves. Hablan de los mecanismos que hacen que las aves sean atraídas por la luz artificial, los tipos de fuentes que más las afectan y cómo influyen los hongos luminosos de las fuentes contaminantes en la desorientación que sufren en las migraciones. Montevecchi (2006) también se centra en las aves e investiga las influencias de la iluminación artificial en los pájaros marinos. Su trabajo trata de las fuentes de luz artificial en el medio marino, como los faros, etc. Asimismo, da recomendaciones acerca de cómo se pueden reducir los efectos de la luz artificial en las aves marinas. Otra investigación sobre las aves la realizaron De Molenaar, Sanders y Jonkers (2006), que estudiaron la iluminación de las carreteras y su influencia en las aves, concretamente el efecto de la luz artificial en la fisiología y el comportamiento espacial, y su grave influencia en los biorritmos de las aves.



Los animales marinos, que, como ya se ha mencionado, también se ven afectados por la iluminación artificial nocturna, han sido estudiados por Salmon (2006), que da recomendaciones para proteger las tortugas marinas de la luz artificial nocturna en las playas de Florida. Perry y Fisher (2006) trabajaron conjuntamente para explicar los efectos potenciales que observaron al estudiar la relación entre las luces de noche y los reptiles. Por su parte, Buchanan (2006) observó los efectos potenciales de la iluminación artificial nocturna en anfibios como ranas y sapos y, en concreto, algunos problemas que sufren por la iluminación mal gestionada.



Plataforma petrolera marina en Canadá (Fuente: C. Burke, Rich y Longcore, 2006)

Wise y Buchanan (2006) –Buchanan ya había llevado a cabo investigaciones sobre la influencia de la CL en los anfibios– publican un artículo sobre la influencia de la iluminación artificial en el comportamiento nocturno y la fisiología de las salamandras. Explican que la iluminación artificial ha causado un grave desequilibrio en el proceder y en los hábitos de estos anfibios. Asimismo, Nightingale, Longcore y Simenstad (2006) establecen la relación existente entre la iluminación artificial nocturna y los peces. Hablan acerca de la fisiología de estos organismos marinos, de los mecanismos que hacen que respondan ante la iluminación y de cómo ésta representa una grave influencia en su medio ambiente natural. Por su parte, Eisenbeis (2006) investiga la relación entre la iluminación artificial nocturna y los insectos. Se centra específicamente en una población rural alemana donde una gran diversidad de insectos están siendo atraídos por las luminarias de la calle. Siguiendo con los insectos, Lloyd (2006) se centra en investigar la influencia de la luz artificial en las luciérnagas. Manifiesta que la iluminación puede ser un grave problema y causar desorientación y desequilibrio en su medio ambiente natural.

Un aspecto que no se había tratado antes es el efecto de la CL en las plantas, aunque el reino vegetal también se relaciona con la luz, puesto que es fotosensible. En este sentido, Briggs (2006) realiza un interesante trabajo en el que describe la fisiología de las plantas y su respuesta a la iluminación artificial. Habla acerca de los fotorreceptores que reaccionan ante la iluminación y cómo el hecho de contar con una iluminación artificial nocturna excesiva genera un desequilibrio en sus características naturales. Éstas son, en resumen, las investigaciones publicadas en el libro. Consideramos importante mencionarlas, puesto que se trata de un compendio sumamente importante de la investigación del efecto de la CL en la biodiversidad.



Efecto de los faros en la migración nocturna de las aves (Montevicchi, 2006).



Al mismo tiempo, se han seguido divulgando trabajos relacionados con el tema en otras partes del mundo. Podemos mencionar, al respecto, a Raine *et al.* (2007), que han publicado un artículo que investigaba los efectos de la CL en algunas especies de aves de la isla de Malta. En dicho artículo, no sólo exponen las causas y los problemas que origina el exceso de luz artificial nocturna, sino que proponen una serie de soluciones que podrían contribuir a disminuir o evitar el problema. Las principales soluciones consisten en una adecuada gestión de la iluminación artificial de la isla, principalmente en los hoteles. También en 2007, Laboy realizó una disertación para explicar el problema de la contaminación lumínica en Puerto Rico, en la que hacía especial hincapié en sus efectos para la biodiversidad afectada.

Y actualmente también se realizan esfuerzos para relacionar los efectos de la iluminación artificial nocturna en los espacios naturales, como por ejemplo las investigaciones que exponen los problemas que sufren las aves en sus migraciones. En este sentido, en mayo de 2008, Larkin y Szafoni publicaron un artículo titulado “Evidencia de dispersión de aves que emigran juntas por la noche”, centrado en los grupos de aves migratorias llamadas *parvadas* que, a pesar de estar dispersas por más de 100 metros, siguen manteniendo la unidad del conjunto. Larkin y Szafoni (2008) observaron, sin embargo, que en ocasiones algunos elementos provocan una dispersión que divide la parvada en varias. Entre esos elementos se encuentran las estructuras luminosas, las ciudades y la iluminación de las carreteras.

Efemerópteros muertos por el efecto de una luz de seguridad (Rich y Longcore, 2006).





El efecto socioeconómico

Para que haya iluminación artificial, es necesaria la existencia de energía, que en la mayoría de los casos es energía eléctrica. Esta energía ha de producirse por diferentes medios, que también tienen sus efectos y sus costes. A lo largo de los capítulos anteriores, hemos visto que la CL es causada por la iluminación artificial que se dirige hacia lugares donde no se necesita. Por tanto, resulta obvio que, si se incluyen mejoras en esta iluminación y se elimina la que va mal dirigida, reduciremos costes. Sin embargo, algunos autores apuntan otros efectos socioeconómicos de la CL. Los aspectos socioeconómicos están relacionados con la población de las ciudades y la economía de las mismas. En relación con la CL, podemos mencionar aspectos de seguridad –tanto pública como vial–, los gastos energéticos que ya se han expuesto, los ambientes donde incide la CL –y que incluyen tanto los de descanso como los de trabajo–, el diseño de la iluminación y algunos otros efectos, que serán tratados en el apartado siguiente.

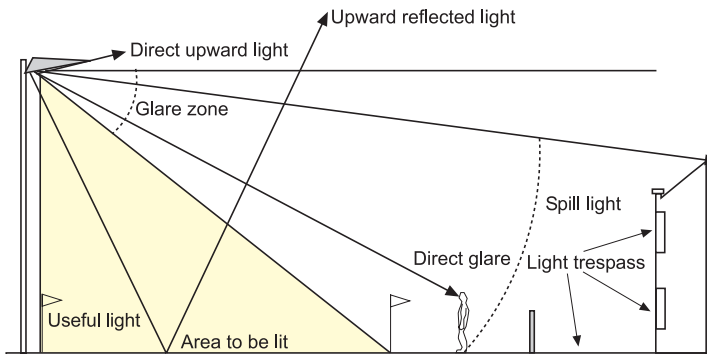
Como se recordará, la investigación de la CL surgió cuando los astrónomos empezaron a ver afectadas sus observaciones. Posteriormente, se fueron descubriendo nuevos efectos. Incluso se crearon organizaciones, no sólo de astrónomos, para estudiar y divulgar el problema. La primera de ellas fue promovida por Crawford y Hunter (1988), que constituyeron una asociación internacional muy importante contra la CL, la International Dark-Sky Association (IDA) o Asociación Internacional para el Cielo Oscuro, todavía existente, integrada por personas que desean reducir la CL. Los miembros de dicha organización “reclaman” el cielo oscuro de noche, de modo que se puedan ver las estrellas, así como reducir los efectos de la iluminación artificial en el medio ambiente y el mal uso de la energía, con todos los gastos que conlleva.

En los años posteriores, la IDA siguió organizando congresos, siempre orientados a una mayor comprensión del fenómeno y a la búsqueda de la disminución del efecto del problema, en todos sus aspectos. Cinzano (1993) realizó una interesante recopilación de las publicaciones de la asociación entre 1988 y 1993. Además, uno de los fundadores de la IDA, Hunter (1991), realizó una investigación bastante interesante sobre el coste económico de la CL y los datos que obtuvo eran alarmantes. Hunter (1991) aseguraba que, para generar la electricidad desperdiciada por la iluminación que se va por encima de la horizontal, se necesitaban 30 millones de barriles de petróleo, lo que cuesta a los Estados Unidos mil millones de dólares al año. La IDA adquirió importancia y en la actualidad es tan reconocida que muchos fabricantes de luminarias se enorgullecen de tener el certificado de “luminaria respetuosa con el cielo oscuro”, emitido por la asociación.

Como ya observamos en párrafos anteriores, también los humanos sufrimos efectos al estar expuestos a la CL. En este sentido, Tanner (1991) investiga sobre un problema socioeconómico al que no se había concedido la importancia que tenía: la luz intrusa. Se trata de la luz molesta que entra por la ventana de noche y que nos obliga a bajar las persianas para poder dormir adecuadamente. La luz intrusa afecta a los humanos en muchos sentidos, a corto plazo –perturbaciones del sueño y estrés, entre otros– y a largo plazo –en diferentes enfermedades que ya han sido comentadas. Tanner recomienda una mejor distribución y control de la iluminación, principalmente de la de tipo público.



Ejemplo de luz intrusa
-light trespass (Light-
ning Research Center,
2010)



Asimismo, la UNESCO mostró preocupación por el problema. Esta preocupación ha adquirido tal grado que se lucha porque el cielo nocturno sea declarado Patrimonio de la Humanidad. Esta preocupación se inició en julio de 1992, cuando la UNESCO aprobó la Declaración sobre reducción de los impactos ambientales adversos a la astronomía, con el apoyo de la IDA y de astrónomos que veían el problema creciente que afectaba sus observaciones. Fue una manifestación de gran importancia para los investigadores de la CL.

A continuación, se comenta el texto íntegro, debido a la importancia que ha tenido para todas las divulgaciones e investigaciones sobre la CL (Anon, 1993):

“Nosotros, los participantes de la Exposición IAU/ICSU/UNESCO sobre Impactos Ambientales Adversos a la Astronomía declaramos que el cielo nocturno, con sus hermosas estrellas y su mensaje acerca de nuestro lugar en el Universo, es un precioso tesoro de la humanidad, en el cual confiamos para nuestro conocimiento y comprensión de nuestros orígenes y destino, y que la astronomía es una de las más fundamentales, apreciadas y accesibles de las ciencias.

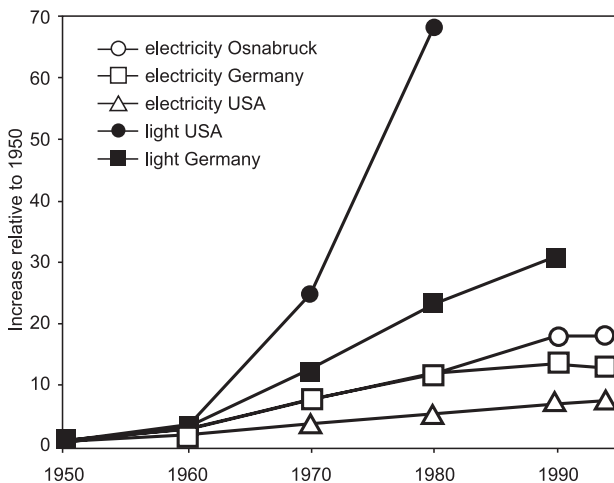
Sin embargo, encontramos de la civilización que nutre nuestra ciencia está produciendo un entorno con una influencia negativa desesperadamente seria sobre la ciencia astronómica. Los cielos, que han sido, y siguen siendo, una inspiración para toda la humanidad, han sido dañados hasta el punto de ser desconocidos para las nuevas generaciones. Un elemento esencial de nuestra civilización y cultura está perdiéndose rápidamente y ésta pérdida afectará a todos los países del mundo.

Creemos que éste es un problema global que debe ser abordado por organizaciones intergubernamentales y, acordemente, solicitamos a la UNESCO y al ICSU (Consejo Internacional de Uniones Científicas) a emplear todos los medios disponibles para proveer asistencia a la astronomía; a preservar los sitios de los mejores observatorios astronómicos con la protección adicional de la designación como Patrimonio de la Humanidad; a instar a estados miembros a proveer protección legal a sus principales observatorios con el fin de preservar las condiciones naturales de observación; a instar a las agencias espaciales y al Comité de las Naciones Unidas para el Uso Pacífico del Espacio Exterior a lograr acuerdos en los niveles de desperdicios espaciales y buscar procedimientos factibles de remover esta amenaza a la observación astronómica; a instar a todas las organizaciones gubernamentales, intergubernamentales y no-gubernamentales cuyas

actividades puedan afectar el ambiente astronómico a poner el mayor empeño en asegurar que el impacto de sus efectos sea mínimo y a perseguir la investigación de vías para la potencial protección legal a nivel internacional.”

Posteriormente, surgieron cada vez más investigaciones que se centraban en el problema –por lo general, de astrónomos–, que, con pretensión divulgativa, publicaban artículos que incluían la explicación general del problema y daban propuestas para su mejoramiento. Retomando el aspecto socioeconómico, Di Sora (1993) publicó en Italia sobre una ley dedicada a la conservación de la energía y la lucha en contra de la CL. Fue así como los analistas de la CL empezaron a ver factible la idea de proponer leyes y reglamentos, con apoyos gubernamentales, para poder controlar el problema. Sin embargo, a pesar de que muchos investigadores analizaban el problema y lo exponían al público, seguían habiendo grandes dudas y faltas de entendimiento que los investigadores querían evitar. Es por ello que hubo importantes aportaciones encaminadas a explicar el problema de forma clara, dejando a un lado las expresiones matemáticas y los lenguajes tecnicados, como el artículo que presentó Crawford (1994) en una reunión de la IDA, donde intentaba explicar el problema de manera general y realizaba propuestas sencillas de mejora.

Continuando con el análisis del problema, podemos mencionar una investigación que realizó Hanel (1997) en Alemania, titulada “La situación de la CL en Alemania”, centrada en un pequeño pueblo alemán llamado Osnabrück. Tomó datos estadísticos y, a partir de ellos, trazó una evolución histórica del problema para determinar el gasto de energía y su incremento.



Incremento de la electricidad y de la iluminación a lo largo de los años (Hanel, 1997)

También Green (1997) realizó una contribución a la revista The donde incluye buenas referencias al problema y agradece también el artículo publicado por Holmes (1997), quien hace una caracterización de la iluminación de carreteras y da recomendaciones de iluminancias estándar, con el fin de evitar reflejos excesivos.

En cuanto a tecnologías de iluminación, se han realizado esfuerzos para desarrollar luminarias que permitan distribuir mejor la luz y así disminuir la CL y el gasto



energético –de hecho, actualmente es un requisito indispensable en los fabricantes de luminarias. Kawakami e Isobe (1998) realizaron un estudio fotométrico de diferentes luminarias utilizadas en Japón, basándose en los requerimientos de la Comisión Internacional de la Iluminación.

Ya hemos mencionado la importancia de proponer leyes y reglamentos para tratar correctamente el problema. En este sentido, cabe señalar que Cataluña fue una de las primeras comunidades autónomas del Estado español en proponer leyes: en mayo de 2001 se aprobó la *Llei 6/2001, de 31 de maig, d'ordenació ambiental de l'enllumenament per a la protecció del medi nocturn*. Posteriormente, San Martín (2003), uno de los primeros investigadores españoles que se centraron en el estudio del problema, publicó el artículo “Contaminación lumínica en España: Un problema ambiental en la sociedad de desarrollo” en la revista *Energía en Acción*. En el artículo, se habla acerca de los principales problemas de la CL: problemas en los seres humanos, en las plantas y en los animales, de derroche energético y en la astronomía. Y también se dan consejos para disminuir la CL.

En 2004, el Instituto de Astrofísica de Canarias, uno de los más importantes observatorios del mundo, realizó una serie de recomendaciones para la iluminación de instalaciones de exteriores o en recintos abiertos. En ellas, se establecen diferentes parámetros a tener en cuenta para preservar de manera correcta la vida nocturna. Se incluyen recomendaciones para la flora y la fauna, los parques, las carreteras y la luz intrusa, entre otros, y también se toma en consideración el problema del costo energético (Anon, 2004).

Retomando la cuestión de la reglamentación, en Inglaterra surge también la preocupación por establecer un reglamento de acuerdo con las necesidades de los astrónomos. Baddiley (2004), miembro de la Asociación Astronómica de la Gran Bretaña, realizó una serie de predicciones entre las cuales auguraba el aumento de la CL en los próximos años, si no se tomaban medidas de regulación, con lo cual motivaba a los gobiernos a adoptar dichas medidas.

Recientemente se ha empezado a desarrollar y a diseñar tecnología de iluminación artificial basada en la reducción de la CL y cada vez el problema se entiende mejor. En este sentido, Xu (2007), del GuangZhou Institute of Energy Conversion, ha patentado hace pocos meses un invento consistente en una cubierta de cristal para cubrir las luminarias que reduce la CL. Esta cubierta utiliza un compuesto de óxido de metal como película conductora transparente, con un índice de refracción de entre 1,7 y 2,2 en la longitud de onda de 555 nm. Asimismo, la película óptica opuesta de antirreflejos tiene un índice de refracción de entre 1,2 y 1,8 en la longitud de onda de 550 nm. Éste artefacto puede reducir la reflectividad lumínica visible hasta en un 6%, comparándolo con un cristal común; es de bajo coste, anticorrosivo y de buena durabilidad.

En nuestros días, continúan las investigaciones en materia de CL y su efecto socioeconómico. En este sentido, los grupos ambientales y los gobiernos realizan campañas y acciones para que cada vez sean más las personas conscientes del problema. En 27 de marzo de 2010, con motivo de un evento denominado “la hora del planeta”, se apagaron a la misma hora monumentos y edificios que normalmente están adornados con iluminación artificial por la noche, con el fin de concienciar acerca de la conveniencia de ahorrar energía. Algunos activistas

de la CL aprovecharon el evento para tomar fotografías del antes y el después, que evidenciaron la cantidad de CL que provocan algunos edificios (World Wildlife Fund, 2010).



Algunas imágenes tomadas en "la hora del planeta" (World Wildlife Fund, 2010)



Otros efectos de la CL

En los párrafos anteriores, se han comentado los principales efectos que causa la CL. Existen otros efectos que no han sido tratados con tanto rigor o que se generan indirectamente de los mencionados, como por ejemplo los efectos en el microclima. En el apartado sobre la biodiversidad, se ha tratado el efecto en el microclima natural. Sin embargo, también existe el microclima artificial, el que se genera dentro de las grandes áreas urbanas, debido principalmente a las grandes emisiones de calor y a los gases de efecto invernadero existentes dentro de ellas. La CL es generada por la iluminación artificial y ésta, a su vez, es generada por la electricidad, que necesita energía. Asimismo, la iluminación genera calor en ciertas cantidades –dependiendo del tipo de lámpara y de la longitud de onda de la misma. Por tanto, se podría pensar que la CL genera variaciones más o menos representativas dentro del microclima de las ciudades y que depende de los factores antes mencionados.

Otro problema a tener en cuenta y que no se ha abordado es la visibilidad que se ve afectada por la CL. Ya en diferentes apartados hemos hablado de su incidencia en la visibilidad de algunos animales –sobre todo, en las aves– y en la seguridad vial. También es necesario determinar en qué medida causa desórdenes de visión en los organismos que interactúan con el espectro visible.



Otro efecto que ha sido tratado de manera aislada es el aspecto estético, con el cual se generan otros que comentaremos a continuación. Cabe mencionar, por ejemplo, el aspecto estético de diferentes regiones naturales o, incluso, del cielo nocturno. Como caso puntual, se pueden mencionar las lagunas y las bahías bioluminiscentes de diferentes regiones del planeta. La bioluminiscencia es un fenómeno que se deriva de la característica que presentan algunos organismos vivos de generar iluminación. En el agua, el fenómeno se genera por millones de pequeños microorganismos bioluminiscentes. El resultado final es un mar salado –o, en rarísimas ocasiones, de agua dulce– que brilla en la oscuridad ante los ojos atónitos de quienes lo observan por primera vez. Este fenómeno se puede encontrar en Puerto Rico, donde ya se han sumado esfuerzos para atajar el problema de la CL por medio de la campaña educativa “Puerto Rico brilla naturalmente” (2009), que nace de un proyecto auspiciado por la National Fish and Wildlife Foundation (Fundación Nacional de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos). La afectación de la CL a las bahías mencionadas genera otro problema, que ha tenido efectos sobre todo de tipo económico. Las bahías luminiscentes eran parques turísticos bastante frecuentados por turistas de todo el mundo y, al verse afectadas por la CL, la afluencia de público ha disminuido y, por tanto, también los beneficios económicos.

Dicha campaña también menciona otro efecto, que al ser más filosófico no ha sido tratado sistemáticamente: Se habla del efecto de la CL sobre la inspiración y su incidencia en el lenguaje artístico, y para ilustrarlo se cita un extracto de un libro de José Luis González titulado *La noche que volvimos a ser gente*. En él, nos habla de uno de los apagones históricos que se produjo en la ciudad de Nueva York en la década de 1960, cuando estaba habitada por un gran número de inmigrantes puertorriqueños. Se compara la contaminada ciudad de Nueva York con un Puerto Rico sin excesiva iluminación artificial:

“Había salido una luna de este tamaño, mira, y amarilla, amarilla, como si estuviera hecha de oro, y el cielo estaba todito lleno de estrellas, como si todos los cocuyos del mundo se hubieran subido hasta allá arriba y después se hubieran quedado a descansar en aquella inmensidad. Igual que en Puerto Rico cualquier noche del año, pero era que después de tanto tiempo sin poder ver el cielo, por ese resplandor de las millones de luces eléctricas que se prenden aquí [en Nueva York] todas las noches, ya se nos había olvidado que las estrellas existían.” (González, 1960)



Apendice 2.

Desarrollo e investigación de la modelización matemática de la CL

En el capítulo de los efectos de la CL, se habla de la investigación que realizaron Elvey y Roach (1937) con el objetivo de determinar las condiciones del cielo nocturno utilizando un fotómetro fotoeléctrico. Se podría considerar que esta investigación representa uno de los primeros modelos de análisis de la CL, debido a que tuvo que desarrollarse una metodología de análisis para la obtención de los datos y su posterior tratamiento. En este apartado, observaremos un modelo de cuantificación desarrollado por el Equipo de Estudios Luminotécnicos de la UPC. Sin embargo, primero haremos un breve repaso de los modelos que se han hecho y que están relacionados con la caracterización del problema por medio de funciones y observaciones, de tal forma que la modelización determina las condiciones del cielo nocturno sin necesidad de utilizar fotómetros u otros instrumentos de medición directa del cielo nocturno.

Exploración teórica de modelos existentes

1. Modelo de Walker

Los modelos matemáticos desarrollados con el objetivo de analizar la CL surgieron después de la metodología de Elvey y Roach (1937). El primero fue el de Walker (1970) que toma en consideración la cantidad de población de las ciudades y su relación con la CL y que posteriormente se aplicó en investigaciones prácticas (Walker, 1977). Este modelo también se basa en la distancia existente entre la ciudad y el observador.



Las investigaciones de Walker, por lo general, se centran en la ubicación de los observatorios futuros, espacios con iluminación natural nocturna, y en establecer reglas para localizar apropiadamente los cielos no contaminados. El objetivo era desarrollar una fórmula empírica con la cual fuera posible hallar los lugares más adecuados para las observaciones astronómicas (Walker, 1970). Básicamente, Walker se basa en identificar las ciudades por su número de habitantes (partiendo de censos recientes) y asignar un promedio de flujo lumínico por persona, basado en la experiencia del autor, por lo que se puede argumentar que el modelo es empírico. Para determinar el efecto de la distancia en la afectación de los focos contaminantes –es decir, de las ciudades–, se basa en la fórmula de la ley de la inversa de los cuadrados de la distancia. Aunque es importante señalar que el exponente de la distancia que utiliza Walker (1970) es el 2,5, y no el 2 de la ley de la inversa de los cuadrados de la distancia. Se podría asumir que la absorción de la luz por la atmósfera desempeña un papel en este caso (Narisada y Schreuder, 2004). El presente modelo es relativamente fácil de utilizar, constituye una buena aproximación y tiene sólidas bases empíricas (Shirkey, 2006). Sin embargo, es bien sabido que no todas las ciudades poseen el mismo flujo emitido hacia el cielo –como supone el modelo de Walker–; por tanto, esta es una de sus principales deficiencias. Es decir, es sólo aproximado afirmar que en todos los casos existe una relación acertada entre la población y la CL, pues existen casos en los que esta regla no funciona. Por ejemplo, un centro turístico puede tener mucha CL y poca población (sobre todo en temporada baja). Y otra desventaja es que no tiene en cuenta la dispersión y la extinción de las partículas en suspensión.

2. Modelo de Treanor

Posteriormente, Treanor (1973) se basó en la fórmula de Walker y la mejoró introduciendo factores que correspondían a la dispersión que experimenta la luz por las moléculas en suspensión (Shirkey, 2006). Todo modelo lumínico ha de considerar la dispersión por aerosoles a través de una atmósfera homogénea (Treanor, 1973). El modelo de Treanor (1973) se utilizó posteriormente para calcular la CL en regiones de Italia (Treanor, 1974). Este modelo presenta características positivas, entre las cuales cabe mencionar que tiene en cuenta una aproximación para la extinción atmosférica, es relativamente fácil de utilizar, mejora en algunos aspectos la fórmula de Walker y considera las ciudades como una fuente puntual de luz (Shirkey, 2006). Sin embargo, se observa que sigue proponiendo un flujo lumínico por población, no toma en consideración otras partículas en suspensión y sólo se basa en algunas ciudades italianas para establecer las constantes que propone.

3. Modelo de Berry

Años más tarde, Berry (1976) tomó la fórmula de Treanor (1973) y le agregó cambios para determinar la contaminación producida por el brillo del cenit de la luz proveniente de pequeñas ciudades, que aplicó a diferentes regiones de Canadá. Obtuvo, a partir de los datos visuales y fotoeléctricos, el brillo del cielo (relacionado con el número de pobladores de las ciudades) y una función de la distancia para el promedio de condiciones atmosféricas. Estas funciones fueron utilizadas en un modelo matemático simple para calcular los niveles de CL en Ontario.

De nuevo, entre las ventajas en este modelo destacan que tiene en cuenta la extinción atmosférica de la luz y que considera las ciudades como una fuente puntual de luz (Shirkey, 2006). Sin embargo, sigue recurriendo a un promedio de flujo lumínico por población sin formular otras partículas en suspensión y sólo se basa en Ontario para proponer constantes. En realidad, se trata simplemente de una nueva utilización del modelo de Treanor (1974).

4. Modelo de Pike

Aquel mismo año, en junio, Pike (1976) desarrolló un segundo modelo de propagación y dispersión de la luz en la atmósfera. Éste modelo se utilizó para calcular las contribuciones de la CL de las distintas ciudades de Ontario Meridional y sus alrededores. Se trataba del mismo modelo que había propuesto Berry (1976), aunque Pike computó los resultados. Para el tratamiento experimental de los datos, utilizó un programa básico computacional. El programa realizaba gráficos de acuerdo con los datos que obtenía y así se realizaban los mapas lumínicos. El objetivo principal de este modelo fue llevar a cabo una proyección a futuro del crecimiento de la CL en Ontario.

Entre sus ventajas, además de las mencionadas en el modelo de Berry, cabe mencionar la utilización de un programa informático para el tratamiento de los datos y el hecho de que en este modelo también se tiene en cuenta la extinción atmosférica. Y, como desventajas, encontramos de nuevo que el flujo lumínico se obtiene a partir de la población y que se basa sólo en las ciudades de Ontario para el cálculo del flujo lumínico como constante.

5. Modelo de Garstang

Garstang (1984) presentó un modelo para la medición de la CL, que representaba el brillo del cielo de noche, basándose en la luminancia del cielo nocturno. Garstang se apoyó en el modelo de Walker (1970) para comprobar sus resultados. El modelo de Garstang también fue realizado con el fin de localizar observatorios astronómicos. La comprobación y la mejora del modelo se dieron a conocer más tarde (Garstang, 1986). Este modelo contaba con algunas características que lo hacían más atractivo que sus antecesores, aunque mantenía la estandarización del flujo lumínico por habitante, basado en estimaciones empíricas. El modelo de Garstang (1984) ha sido considerado un modelo de segunda generación, puesto que supera a sus antecesores al realizar una modelización completa del efecto de la atmósfera en la CI. Garstang generaliza la ciudad como un disco uniforme parecido a una fuente puntual, utiliza una escala de atmósferas tomando en consideración los aerosoles y las moléculas, agrega un parámetro que representa el número de aerosoles, permite un modelado angular de la distribución de luz y tiene en cuenta una distribución lambertiana para los reflejos y el flujo lumínico que parte de los focos contaminantes.

Este modelo, pues, toma en cuenta los aerosoles y otras partículas en suspensión. Como desventajas, podemos mencionar que sigue relacionando el flujo lumínico con la población y que no incluye los efectos de las nubes (Shirkey, 2006).



6. Modelo de Albers y Duriscoe

Según las revisiones teóricas, pasaron varios años hasta que surgió una nueva propuesta para la caracterización de la CL. Albers y Duriscoe (2001) manifestaron que el clima y los aerosoles suspendidos en el ambiente también tienen una cierta relación con el modelado de la CL. Estos investigadores se basaron en el modelo de Walker (1970) para realizar su modelo, que también tenía en cuenta el número de personas por ciudad con relación al flujo lumínico. La diferencia es que ellos se basaron en la curvatura de la Tierra y incluyeron este factor dentro de la fórmula. Con esta ecuación, realizaron mapas lumínicos por todo el país (Estados Unidos).

Encontramos, pues, como característica positiva de este modelo el hecho de incluir la curvatura de la Tierra, que afecta grandes distancias. Como desventajas, vemos que, al igual que el modelo de Walker (1970), estandariza las ciudades y da un trato empírico a la atmósfera.

7. Modelado con observaciones de estrellas

Los astrónomos se percataron de la CL cuando dejaron de ver las estrellas. Por tanto, cabe pensar que, cuanto mayor es la CL, menos estrellas pueden observarse. Y así se evidenció cuando, en 2003, estudiantes de ciencias de la preparatoria Tucson High, la secundaria Vail y el programa de educación de NOAO realizaron un proyecto para poder modelar la CL utilizando el conteo de estrellas. La investigación se centró en aquellas constelaciones que podían observarse más fácilmente, con la ayuda de plantillas diseñadas al efecto, y al analizarlas en diferentes circunstancias y noches se encontró una relación entre la CL y la visibilidad de las constelaciones (Walker *et al.*, 2003). Años antes, en Tokio, Isoe y Kosai (1998) habían realizado un trabajo más profesional, basado en observaciones fotográficas, que les permitieron desarrollar un método empírico que funcionaba con una fórmula simple.

El método de observación de las estrellas nos da una buena aproximación del problema de la CL y es de fácil uso. Sin embargo, el conteo de estrellas es bastante empírico y caben distintas interpretaciones según las personas; además, en el caso de realizar observaciones, es necesario conocer las magnitudes de referencia.

8. Modelo de Aubé

Otro factor, que aún no se había tomado en consideración y que es de gran importancia, es la orografía o las características topográficas del terreno. Aubé (2005) desarrolló un modelo denominado ILLUMINA, que tiene en cuenta no sólo los factores que funcionan del modelo de Garstang (1986), sino que también utiliza variables como variaciones en la topografía y la reflectancia que presenta la luz. La primera generación de modelos tiene algunas características que hace que los datos no sean totalmente fiables. Por ejemplo, la mayoría de ellos



representan una ciudad como un círculo perfecto de constante luminosidad y reflectancia. Es decir, no consideran la orografía del terreno (Aubé, 2006). Sin embargo, el modelo desarrollado finalmente exige tener que realizar mediciones *in situ*, tanto de la CL como de los aerosoles en suspensión en el momento de la medición (Shirkey, 2006).

Esquema del modelo completo (Solano, San Martí, García, 2010)

El modelo de Aubé (2005) es una aproximación bastante buena y quizá el modelo más exacto que existe actualmente, al contabilizar los aerosoles y la CL en tiempo y espacio. Sin embargo, entre sus desventajas destacan que no sólo utiliza una fórmula o modelo matemático y que también se necesita un espectrofotómetro de precio elevado para hacer comparaciones con los datos obtenidos y determinar la cantidad exacta de aerosoles. Así, también se necesitan conocimientos especializados para utilizar los instrumentos requeridos y las computaciones pueden requerir días en un ordenador normal, en palabras del propio Aubé (2005).

9. Modelo de Kocifaj

Kocifaj (2007) toma en consideración otro factor de notable importancia: el clima en el momento de la medición. Kocifaj publica un artículo donde presenta un nuevo modelo para la medición de la CL, que acababa de idear. Este modelo se centra en las fuentes de luz terrestres y su relación con las nubes o las condiciones del cielo cubierto. El modelo es utilizable no sólo con nubes, sino que también es posible estimar la CL con la atmósfera despejada. Kocifaj (2007) también realiza una aproximación para identificar las moléculas y los aerosoles en suspensión en el ambiente estudiado, así como la extinción y la dispersión que experimenta la luz desde la ciudad hasta el observador. Asimismo, realiza tratamientos geométricos para integrar definitivamente en altura, teniendo en cuenta las coordenadas polares para la ciudad.

Como principal ventaja, encontramos que el modelo de Kocifaj (2007) tiene en cuenta las condiciones de nubosidad, y que involucra también los aerosoles y las moléculas en el ambiente, por lo que es de los modelos matemáticos más completos. Pero también hay que señalar que no toma en consideración otras condiciones climatológicas adversas y que es un modelo teórico, que no ha sido probado en la práctica, sino sólo con simulaciones.

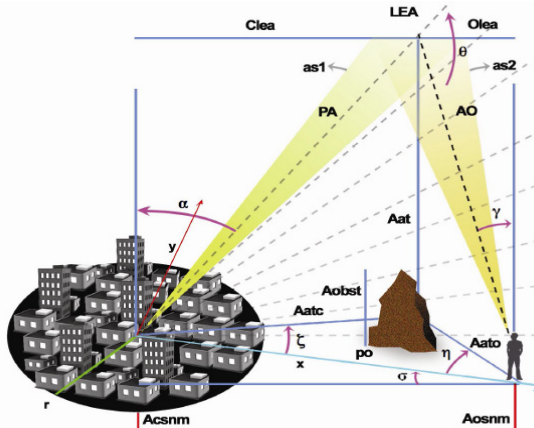
10. Conclusiones

Las investigaciones anteriores corresponden a los modelos que existen actualmente para la caracterización de la CL. Éstos han sido probados, acogidos y aprobados por los desarrolladores en diversas investigaciones. Entre ellos, destaca el modelo de Walker (1970), que a pesar de que es el más antiguo –o debido a ello– ha sido el más utilizado. Además, es muy fácil de usar y ofrece una aproximación media al problema.

Presentación del modelo

El presente modelo fue realizado como parte de una tesis doctoral presentada en el Equipo de Estudios Luminotécnicos de la UPC. La explicación se llevará a cabo en dos partes y con la ayuda del esquema que se presenta a continuación.

Se desarrolla la fórmula completa para una atmósfera sin condiciones adversas de clima, teniendo en cuenta tanto los factores que se irán exponiendo como los principios de la fotometría.



Si representamos la ciudad como un foco contaminante, asumimos que está compuesta de un sistema de iluminación artificial nocturna. Este sistema se puede contabilizar y, por tanto, obtener el flujo total instalado correspondiente al foco contaminante. Esta contabilización se puede llevar a cabo, de manera muy eficiente, por medio del método RAMA-L, que se ha explicado detalladamente en capítulos anteriores. Se realiza un modelado para determinar la afectación de las instalaciones de alumbrado artificial. La mayoría de los modelos analizados hasta el momento sólo indican una aproximación del flujo por cada habitante.

En el presente modelo, el foco contaminante se toma de manera puntual. Cabe recordar que es posible representarlo siguiendo el ejemplo de Garstang (1986), escogiendo un punto central del cual parten dos ejes (x , y) y la circunferencia con un radio r , que dependerá de las dimensiones de la ciudad. El hecho de tomar en consideración la ciudad como un área circular uniforme sobre un plano horizontal permitirá obtener mejores resultados a los observadores que se encuentren dentro de la ciudad (Shirkey, 2006). Por tanto, como el presente modelo se orienta a determinar el efecto de la CL fuera del foco, continuaremos tomando el foco como un punto.

Primero, se contabiliza el flujo lumínico perteneciente a la ciudad, como lo hace el modelo RAMAL-L. Para el presente modelo, es necesario tomar uno de los indicadores utilizados en el modelo RAMAL-L y caracterizarlo para obtener los datos necesarios en la fórmula. Tenemos un flujo lumínico dirigido que corresponde a la EFS que parte de la ciudad hacia el primer ángulo sólido, que podemos denominar también *flujo luminoso*, y que mide la energía global emitida por el foco contaminante. Por tanto, este flujo se representa:

$$Flha = AC \times EFS \times \text{Cos}\alpha \, d\Omega 1 \tag{1}$$

$$d\Omega 1 = \frac{ds1}{pa^2} \tag{2}$$

$$ds1 = dh * dv \tag{3}$$

donde:

$Flha$ = flujo lumínico hacia ángulo sólido primario

Ac = área de la ciudad –si se toma la fuente puntual, el Ac siempre será igual a 1

EFS = emisión de flujo superior

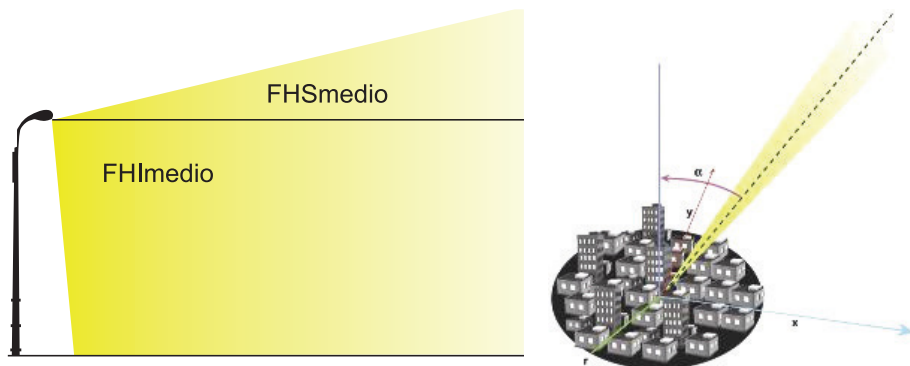
α = ángulo que se forma entre el cenit y la línea del flujo dirigido

$d\Omega 1$ = diferencial de ángulo sólido primario. El ángulo sólido que representa el flujo lumínico que parte de la ciudad se denomina ángulo sólido primario. Éste ángulo guarda relación con el volumen en el que los fotones impactan en la atmósfera y la distancia existente entre dicha superficie y la ciudad. Es decir, el flujo luminoso recibido por la atmósfera (Wolfram Research, 2010).

$ds1$ = superficie elemental de primer ángulo sólido

$dh * dv$ = lados de la superficie elemental de ángulo sólido, representados en la figura

pa = distancia entre el foco y el volumen donde impactan los fotones. La ley de la inversa del cuadrado o *ley cuadrática inversa* se refiere a algunos fenómenos físicos cuya intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia al centro donde se originan. Como consecuencia de la propagación de la luz en línea recta, esta ley también es utilizada en la iluminación. Denominamos pa la distancia y, debido a la ley cuadrática inversa, esta pa se encuentra elevada a un cuadrado negativo.





Cómo determinar las distancias y los ángulos

Existe una distancia entre la ciudad o foco contaminante y el volumen en donde se impactan los fotones, provenientes del foco, desde donde inician un nuevo camino hacia el observador o punto de interés –desde el ángulo sólido primario hasta el ángulo sólido secundario. Esta distancia guarda relación con la distancia que existe entre la ciudad y el observador. Básicamente, es la hipotenusa perteneciente al triángulo que involucra la ciudad –si se realizan las observaciones hacia el cenit a 90 grados–, el observador y el punto de impacto de los fotones en la atmósfera, pero esto sólo funcionaría con sólidos. Y cabe recordar que la atmósfera no es un sólido, sino un medio por el que pasa la luz. Por tanto, lo que tenemos que determinar en este modelo es la **AAT** (véase la figura), debido a que se tendrá que integrar definitivamente desde la superficie hasta ella. En caso de que se realicen observaciones en diferentes ángulos, es necesario realizar operaciones geométricas diferentes. A continuación, se muestra gráficamente y, más adelante, se indica cómo obtener los ángulos y las distancias de trabajo. El factor que interesa conocer es el ángulo α , que es el que guarda relación entre el flujo lumínico emitido y su direccionalidad –dependiendo de la distancia entre la ciudad y el observador, y de los ángulos del observador α y γ , que ya se conoce. Por tanto, basándonos en las características del modelo y en la geometría analítica, tenemos:

$$\alpha = \text{ArcCos} \left(\left(1 + \text{Tan}^2 \gamma \right) + \frac{PO}{Aat} \times \left(\frac{PO}{Aat} - 2 \text{Tan} \gamma \cos \eta \right) \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

donde:

γ = ángulo cenital del observador

PO = distancia entre el punto contaminante y el observador

Aat = altura efectiva de atmósfera

η = ángulo acimutal del observador

Analizando Aat , la altura de la atmósfera, que es el término que se desconoce de la fórmula anterior, tenemos que ésta depende no sólo de los ángulos, sino que también guarda relación con la altura que tengan tanto la ciudad como el observador. Como consecuencia de los análisis anteriores, tenemos:

$$Aat = 9,996 - \text{ABS}(CLEA - PO) * \text{Sen} \sigma \quad (5)$$

$$\sigma = 90 - \text{Arc tan} \left(\frac{PO}{AOSNM - ACSNM} \right) \quad (6)$$

$$CLEA = Aatc * \text{Cos} \xi \quad (7)$$



$$Aatc = \sqrt{(PO^2 + Aato^2) - (2 * PO * Aato) * Cos\eta} \quad (8)$$

$$Aato = \frac{OLEA}{Cos\eta} \quad (9)$$

$$OLEA = AO * Sen\gamma \quad (10)$$

$$AO = \frac{9,996 - AOSNM}{Cos\gamma} \quad (11)$$

donde:

σ = ángulo que se forma entre la diferencia de alturas de la ciudad y el observador a nivel del mar

$Clea$ = distancia de atmósfera entre la ciudad y la altura efectiva de atmósfera

$Olea$ = distancia de atmósfera entre el observador y la altura efectiva de atmósfera

α = ángulo cenital del flujo dirigido

ξ = ángulo acimutal del flujo dirigido

AO = distancia del segundo ángulo sólido

$Aatc$ = distancia entre la ciudad y la línea cenital de la altura efectiva de atmósfera

$Aato$ = distancia entre el observador y la línea cenital de la altura efectiva de atmósfera

γ = ángulo cenital del observador

PO = distancia entre el punto contaminante y el observador

Aat = altura efectiva de atmósfera

η = ángulo acimutal del observador

$Aosnm$ = altura del observador sobre el nivel del mar

$Acsnm$ = altura de la ciudad sobre el nivel del mar

Continuando con el modelo, tenemos el flujo luminoso para por el primer ángulo sólido; ahora debemos determinar el comportamiento de la intensidad a través del volumen de ángulo sólido, teniendo en cuenta la distancia y la extinción de la luz en ese paso. Por tanto:



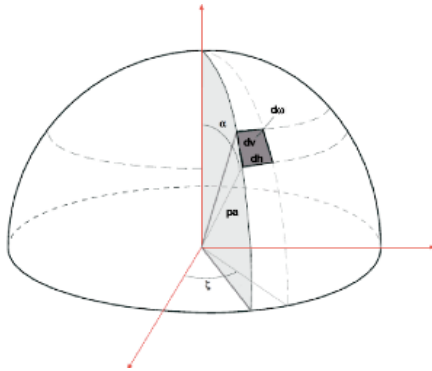
$$Fllea = Ac \times EFS \times \cos\alpha \frac{dS1}{pa^2} C1 \quad (12)$$

donde:

$Fllea$ = flujo lumínico hacia la atmósfera

$C1$ = primer coeficiente de transmisión

Representación gráfica del primer ángulo sólido (Solano, San Martín, García, 2009).



Cómo calcular el coeficiente de transmisión

La atmósfera que atraviesa el flujo lumínico en su camino desde la ciudad está compuesta principalmente de moléculas de aire y aerosoles. Y, a una mayor altura de la capa efectiva de la atmósfera, se encuentra también el ozono. Habrá extinción por moléculas y aerosoles desde la salida del flujo lumínico de la ciudad y hasta la llegada al observador, y habrá extinción por ozono a alturas superiores a los 10 km. Cabe aclarar que el ozono se encuentra a una altura superior a los 10 km, por lo que, si se toma en consideración una altura de atmósferas superior a los 10 km, lo cual es inusual, se recomienda incluir una corrección por ozono. El coeficiente de transmisión de la atmósfera, teniendo en cuenta la ley de Beer-Lambert-Bouguer, se obtiene mediante la fórmula que se indica a continuación, según Houghton (2002).

$$CT = \exp^{-kX} \quad (13)$$

donde:

$k\lambda$ = extinción atmosférica (dependiendo de la partícula)

X = masa de aire (para la ciudad y para el observador)

Como todas las caracterizaciones de la presente propuesta son representadas en ángulos inferiores a los 85 grados, podemos utilizar la aproximación desarrollada por Kasteng y Young (1989).

$$X = \frac{1}{\cos Ang + 0,50572(96,07995 - Ang)^{-1,6364}} \quad (14)$$

1. Extinción atmosférica

Para obtener el coeficiente de extinción de la luz por cualquier medio, es necesario tomar en consideración los factores de este medio que extinguen la luz. En el caso de la atmósfera, en las observaciones atmosféricas, como se ha explicado anteriormente, se tienen tres componentes principales: la dispersión de Rayleigh, la dispersión por aerosoles y la extinción molecular, principalmente por ozono. Un coeficiente de extinción anhelado por las personas que estudian el cosmos es el 0,15 (Schaefer, 1987). En un buen centro de observación, como el Cerro Tololo de Chile, se pueden encontrar estos valores. El promedio del coeficiente de extinción atmosférica en el este de los Estados Unidos es del 0,30 (Green, 1992). La extinción total es el resultado de la suma de los siguientes factores:

$$K\lambda = Er + Ea + Eoz \quad (15)$$

donde:

$K\lambda$ = extinción atmosférica

Er = dispersión de Rayleigh

Ea = dispersión por aerosoles

Eoz = extinción por ozono

La obtención del coeficiente de extinción para cada factor se explica con detalle a continuación.

1.1. Moléculas de Rayleigh

Como ya se ha mencionado, en astronomía se tienen en cuenta tres factores para calcular la extinción total de los objetos que se observan. Uno de ellos es la fórmula de dispersión de Rayleigh. Esta fórmula determina cuál es la dispersión que experimenta la luz al atravesar las partículas de aire. La fórmula es la siguiente:

$$A_{ray} = 9,4977 \times 10^{-3} \left(\frac{1}{\lambda}\right)^4 c^2 \times \exp\left(-\frac{A_{obs}}{7.996}\right) \quad (16)$$

$$c = 0,23465 + \left(\frac{1,076 \times 10^2}{146 - (1/\lambda^2)}\right) + \left(\frac{0,93161}{41 - (1/\lambda^2)}\right) \quad (17)$$

donde:



$A_{ray}(\gamma, h)$ = extinción de Rayleigh (mag/masa de aire)

A_{obs} = altura del observador (km sobre el nivel del mar)

λ = longitud de onda de la luz que se está estudiando

c = índice de refracción

1.2. Aerosoles

El otro factor relacionado con la extinción atmosférica son los aerosoles. Los aerosoles son partículas de polvo fino, gotas de agua y contaminación atmosférica. Son más bajas que las moléculas que causan la difusión de Rayleigh. La determinación de los aerosoles es tarea difícil, por las variaciones que experimentan en temporadas y regiones; además, la extinción depende poco de la longitud de onda. Sin embargo, se puede hacer una aproximación muy buena con la fórmula que se presenta a continuación (Stalin *et al.*, 2008):

$$A_{aer}(\lambda, h) = A_o \lambda^{-\Sigma} \exp\left(-\frac{A_{obs}}{H}\right) \quad (18)$$

donde:

λ = longitud de onda de la luz que se está estudiando

A_o = y Σ = dependen del lugar geográfico.

A_o = espesor óptico total de los aerosoles atmosféricos para una longitud de onda de un micrón. Depende del contenido total de partículas y de su eficiencia en la absorción y dispersión de la luz (Stalin *et al.*, 2008). Normalmente, se toma una constante de 0,087 (Bessel, 1990; Mohan *et al.*, 1999).

Se recomienda tomar un valor de 1,3 para Σ (Angstrom, 1961; Schaefer y Bulder, 1992; Green, 1992).

A_{obs} = altura del observador (km sobre el nivel del mar)

H = escala de alturas $H \approx 1,5$ km. Usualmente, se toma este valor como estándar (Hayes y Latham, 1975)

2. Cálculo del coeficiente de transmisión

Tomando en consideración los factores mencionados, tanto para moléculas como para aerosoles, se procede a determinar las características con las que la luz se transmite a través de nuestra atmósfera. El cálculo completo involucra sólo dos fuentes de extinción atmosférica –aerosoles y moléculas– y los dos respectivos viajes de la luz –hacia la atmósfera y hacia el observador. Es verdad que el ozono es una fuente importante de extinción atmosférica; sin embargo, se tiene en cuenta en las observaciones astronómicas, es decir, en la extinción de la luz que viene de fuera de la atmósfera. Como la CL se encuentra dentro de

un espacio efectivo de la atmósfera terrestre y el ozono a una altura superior a los 10 kilómetros, recomendamos no utilizarlo en el modelo, o sólo en casos en los que se tenga la certeza de que existe ozono en el camino de la luz.

Por tanto:

$$CT = \exp^{-XK} = C1 + C2 \tag{19}$$

$$C1 = \exp^{-X1(Ka+Km)PA} \tag{20}$$

$$C2 = \exp^{-X2(Ka+Km)AO} \tag{21}$$

donde:

CT = coeficiente de transmisión total

$C1$ = primer coeficiente de transmisión

$C2$ = segundo coeficiente de transmisión

$X1$ = masa de aire de la ciudad

$X2$ = masa de aire del observador

$(Ka+Km)PA$ = extinción atmosférica entre la ciudad y el límite de atmósfera

$(Ka+Km)AO$ = extinción atmosférica entre el observador y el límite de atmósfera

Hasta este punto, se tiene el flujo luminoso por el primer ángulo sólido en relación con la distancia; por tanto, se han de determinar los fotones que pasarán desde este ángulo sólido hasta el segundo ángulo sólido en dirección al observador. A continuación, se verá la probabilidad para una atmósfera compuesta por moléculas y aerosoles.

Cómo determinar la probabilidad de dispersión

Como se ha ido analizando a lo largo del presente trabajo, la atmósfera consiste en una composición de partículas moleculares y aerosoles que interaccionan con la iluminación que parte del flujo contaminante. En este apartado, se analiza la dispersión que experimentan, debido a la composición atmosférica, los fotones en su trayecto desde la ciudad hasta el punto en el que comienzan su retorno hacia el observador. Se deberá determinar la probabilidad de que un fotón emitido por el foco contaminante y transmitido a través del ángulo sólido primario sea dispersado hacia el ángulo sólido secundario y, por tanto, llegue al observador. Existen dos clases de dispersiones. La dispersión por componente molecular y la dispersión por partícula de aerosol. Como las dos dispersan la luz de manera diferente, se utiliza una fórmula diferente para cada una de ellas.



Siguiendo a Baddiley (2004) y a Kocifaj (2007), se tiene en cuenta la función de la fase de dispersión. De esta manera, para determinar el efecto del primer ángulo sólido en el segundo y, por supuesto, en el observador, debe realizarse una integración definida en toda la línea de Aat , desde el suelo hasta la altura efectiva de atmósfera. Cuando la luz golpea una partícula con un índice de refracción diferente de su medio ambiente, se produce refracción. Las características de dicha refracción dependerán de las características de las partículas (Prahl, 1988). Así pues, la fórmula utilizada se muestra a continuación:

$$Prob = \frac{1}{4\pi} FF(1,2)D \quad (22)$$

donde:

D = coeficiente de dispersión

FF = función de la fase de dispersión. Esta función describe la cantidad de luz dispersada desde la dirección del vector I , dentro de la dirección del vector 2 –en el caso de la presente propuesta, ángulo sólido primario y ángulo sólido secundario. La función más utilizada es tratarla por medio de la probabilidad de distribución (Prahl, 1988).

En este caso, la fórmula

$$\frac{1}{4\pi} P(1,2)$$

satisface la condición de normalización: $\int 4\pi p(1,2) dw = 1$. La función de fase de dispersión molecular, según Baddiley (2004), será:

$$FFm = \frac{3}{4} (1 + \cos^2 \theta) \quad (23)$$

La función de fase para la dispersión por aerosoles, según Kocifaj (2007), será la siguiente:

$$FF\alpha = \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{\frac{3}{2}}} \quad (24)$$

donde, de acuerdo con las características del modelo y analizando geométricamente, tenemos:

$$\theta = \text{Arc cos} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{p\sigma^2}{Aat^2} \cos \gamma \cos \alpha - \frac{\cos \alpha}{\cos \gamma} - \frac{\cos \gamma}{\cos \alpha} \right) \right) \quad (25)$$

y donde:

$$g = \frac{1}{2} \int_{-1}^{+1} P \cos \theta d(\cos \theta) = \frac{\beta}{3} \quad (\text{Lenoble, 1985})$$

Para cálculos numéricos, se puede tomar un valor de $g = 0,90$ (Kocifaj, 200).

Por tanto, la dispersión en la presente propuesta se representa mediante la siguiente probabilidad:

$$Prob = Disp \frac{1}{4\pi} P (FFm + FFa) = Alb \times K\lambda \times \frac{1}{4\pi} (FFm + FFa) \quad (26)$$

donde:

$Disp$ = dispersión

FFm = función de fase para la dispersión molecular

FFa = función de fase para la dispersión por aerosoles

Alb = albedo

$K\lambda$ = extinción

Teniendo en cuenta los factores anteriores:

$$Flho = Ac \times EFS \times \text{Cos}\alpha \frac{dS1}{pa^2} C1C2 \times Prob \times Aro d\Omega2 \quad (27)$$

donde:

$Flho$ = flujo lumínico hacia el observador

$C2$ = segundo coeficiente de transmisión

$Prob$ = probabilidad de dispersión

Aro = área del observador

$DW2$ = diferencial del ángulo sólido secundario

El primer ángulo sólido es proporcional al segundo; la superficie elemental del primer ángulo sólido es proporcional a la diferencial de distancia del segundo (Kocifaj, 2007), por lo que la fórmula anterior pasa a ser:

$$Flho = Ac \times EFS \times \text{Cos}\alpha \times pa^{-2} \times C1C2 \times Prob \times Aro d\Omega2 \quad (28)$$

donde:

dao = diferencial de distancia entre el observador y volumen donde impactan los fotones.



Ahora, basándonos en la geometría del modelo propuesto, tenemos:

$$dao = \frac{dh}{\text{Cos}\gamma} \quad (29)$$

$$pa^{-2} = \frac{\text{Cos}^{-2}\alpha}{Aat^2} \quad (30)$$

$$Flho = Ac \times EFS \times \text{Cos}^3\alpha \times Aat^{-2} \times C1C2 \, dAat \times \text{cos}^{-1}\gamma \times Prob \times Aro \, d\Omega \quad (31)$$

donde:

Aat = altura de atmósfera

$dAat$ = diferencial de la altura de atmósfera. De esta manera, se podrá integrar en una altura de atmósfera definida, basándonos en Kocifaj (2007).

Tomando en consideración otro principio de fotometría, tenemos que la intensidad luminosa recibida por el observador será proporcional al área del observador y al ángulo sólido secundario –ángulo de observación.

Por tanto:

$$IObs = \frac{Ac}{\text{Cos}\gamma} \times \frac{EFS \times \text{Cos}^3\alpha \times Aat^{-2} \times C1C2 \, dAat \times Prob \times Aro \, d\Omega}{Aro \, d\Omega} \quad (32)$$

donde:

$IObs$ = intensidad al observador

Eliminando términos similares y agregando la integración por altura de atmósfera, tenemos:

$$IO = \frac{Ac}{\text{Cos}\gamma} \int_0^{Aat} (EFS \times \text{Cos}^3\alpha \times Aat^{-2} \times C1C2 \times Prob) \, dAat \quad (33)$$

Y, agregando la corrección por obstáculo orográfico y la corrección por curvatura de la Tierra:

$$IO = CU \frac{Ac}{\text{Cos}\gamma} \int_{CO}^{Aat} (EFS \times \text{Cos}^3\alpha \times Aat^{-2} \times C1C2 \times Prob) \, dAat \quad (34)$$

donde:

CO = corrección por orografía

CU = corrección por curvatura de la Tierra

Cómo determinar la corrección por orografía

La orografía es un aspecto que aún no ha sido abordado por los investigadores de la CL, salvo contados casos meramente teóricos, que se han mencionado. Para determinar cómo afecta la orografía a la distribución de la iluminación artificial proveniente de las ciudades se realizó el estudio de los Pirineos. Para la presente propuesta, se asume que un porcentaje de la montaña extingue la luz artificial proveniente de la ciudad y, por tanto, afecta la CL resultante. Empíricamente, observamos que el efecto de la orografía dependerá del tamaño del área contaminante, la distancia a la que se localice la montaña de la ciudad, la altura de la ciudad y el ángulo del observador. Se determina un área hipotética del foco contaminante empíricamente y se determina el área perspectiva del obstáculo en función de la distancia de la ciudad y la distancia del observador.

En apartados anteriores, se ha disertado sobre la dispersión de la luz que sucede a través de la atmósfera compuesta por aerosoles y partículas moleculares, así como la probabilidad de que suceda. También observamos que es necesario integrar definitivamente en el volumen atmosférico para determinar el flujo lumínico resultante. En este caso, la integral viene dada por la fórmula siguiente:

$$\int_0^{Aat} Fl \, dAat \tag{35}$$

donde:

Aat = altura efectiva de la atmósfera

Fl = flujo lumínico

dAat = diferencial de altura de la atmósfera

En caso de que haya obstáculos orográficos entre la ciudad y el observador, recomendamos la siguiente fórmula, agregando el concepto de corrección por orografía:

$$\int_{Co}^{Aat} Fl \, dAat \tag{36}$$

$$Co = Aobst \times Exp \left(- \left((-PO + Dobst) * \frac{Aobst}{Aat * 1000} \right) \right) \tag{37}$$

donde:

Co = corrección orografía

Aobst = altura del obstáculo

PO = distancia entre el punto contaminante y el observador

Dobst = distancia entre el obstáculo y el observador



Aat = altura efectiva de la atmósfera

En este caso, la observación deberá dirigirse en dirección acimutal al obstáculo. Si se tienen ángulos acimutales en regiones diferentes, la fórmula propuesta no deberá utilizarse.

Cómo determinar la corrección por curvatura de la Tierra

En 2001, Albers y Duriscoe (2001) agregaron una corrección a la ley de Walter, consistente en tener en cuenta la curvatura de la Tierra ante grandes distancias. La curvatura de la Tierra ejerce una influencia en la CL resultante, por lo que deberá tenerse en cuenta para agregar un coeficiente en la fórmula de Walker (Albers, Duriscoe, 2001). A pesar de que esta corrección se utiliza para grandes distancias, no se comete ningún error si se utiliza en la presente propuesta, pues es altamente recomendable hacerlo; ciertamente, es insignificante en pequeñas distancias, pero no crea ninguna especie de ruido al modelo, y en las grandes distancias es utilizada para no incurrir en errores.

$$CU = Exp^{-h/A} \quad (38)$$

$$h = PO \times (1,57 \times 10^{-4} Km) \quad (39)$$

donde:

CU = curvatura de la Tierra

h = relación de curvatura (dependiendo de la distancia)

PO = distancia entre la ciudad y el observador

A = constante de 4.000 metros

Formula final

En el presente modelo, es posible delimitar la longitud de onda que está relacionada con la CL del caso de estudio, integrando definitivamente de acuerdo con la parte del espectro que se conozca de la luz proveniente del foco contaminante (Kocifaj, 2007). Por tanto:

$$IO = CU \frac{Ac}{Cos\gamma} \int_0^{Aat} \left(Cos^3 \alpha \times Aat^{-2} \times \int_{\lambda 1}^{\lambda 2} (EFS \times C1C2 \times Prob) d\lambda \right) dAat \quad (40)$$

donde:

$\lambda 1$ = menor longitud de onda

$\lambda 2$ = mayor longitud de onda

La fórmula 40 corresponde al modelo propuesto para el caso de atmósfera diáfana, sin tener en cuenta condiciones de climatología adversa. Para convertir a



luminancia, hemos de conocer la superficie aparente perteneciente al volumen de atmósfera. Esta superficie, en metros cuadrados, nos dará la aproximación de la luminancia que afecta al observador. La superficie aparente dependerá de la distancia y del ángulo de observación. Así, también podemos convertir los valores de luminancia en mag/arcsec,² con una conversión recomendada por Zotti (2007).

$$(Mag / Arcsec^2) = 12,603 \log_{10}(Cd / m^2) \quad (41)$$





Bibliografía

Situación a escala mundial

[1] Cel Fosc, Associació contra la Contaminació Lumínica, <<http://www.celfosc.org/>>.¹

[2] CINZANO, P. (1993): *References on Light Pollution and Related Fields*. Padua: Departamento de Astronomía, Universidad de Padua.

[3] CINZANO, P.; FALCHI, F.; ELVIDGE, C. D. (2001): *The First World Atlas of the Artificial Night Sky Brightness*. Padua: Departamento de Astronomía, Universidad de Padua.

[4] International Dark-Sky Association, <<http://www.darksky.org/>>.

[5] SOLANO LAMPHAR, H. A. (2010): “Medición de la contaminación lumínica en espacios naturales. Propuesta de un modelo predictivo”. Tesis doctoral. Barcelona.

[6] SÁNCHEZ DE MIGUEL, A. (2007). *Differential Photometry Study of the European Light Emission to the Space*.

[7] SÁNCHEZ DE MIGUEL, A., ZAMORANO CALVO, J., PILA DÍEZ, B., RUBIO JIMÉNEZ, J., RUIZ CARMONA, R., RODRÍGUEZ HERRANZ, I., & GONZÁLEZ PÉREZ, A. (2010). *Contaminación lumínica en España 2010. Highlights of Spanish Astrophysics VI*.

Otros efectos de la CL

[1] ANON (1993): “Declaration on the Reduction of Adverse Environmental Impacts on Astronomy”. En: IAU (ed.) IAU/COSPAR/ICSU/UNESCO Meeting, Adverse Environmental Impacts on Astronomy: An Exposition. París.



- [2] ANON (1995): *Urban Ecology, Living and Working in Harmony with the Environment*. Bonn: Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau.
- [3] ANON (1999): "Night Lights Affect Visual Performance". *Intermediar*.
- [4] ANON (2004): *Recomendaciones para la iluminación de instalaciones de exteriores o en recintos abiertos*. San Cristóbal de la Laguna: Instituto de Astrofísica de Canarias.
- [5] BADDILEY, C. J. (2004): *Light Pollution in the UK*. British Astronomical Association, Campaign for Dark Skies.
- [6] BAKER, B. J.; RICHARDSON, J. M. L. (2006): "The Effect of Artificial Light on Male Breeding-Season Behaviour in Green Frogs, *Rana clamitans melanota*". *Canadian Journal of Zoology*, 84, 1528-1532.
- [7] BARUCH, J. E. F. (1998): "Public Education to Preserve Dark Skies and Astronomical Windows with Eavesdropping and Robotic Telescopes". En: SYUZO, I.; TOMOHIRO, H. (eds.) *Preserving the Astronomical Windows*, 23rd General Assembly of the International Astronomical Union. Kyoto, Japón.
- [8] BERRY, R. L. (1976): "Light Pollution in Southern Ontario". *The Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 70, 3.
- [9] BIRD, B. L.; BRANCH, C. L.; MILLER, D. L. (2003): "Effects of Coastal Lighting on Foraging Behavior of Beach Mice". *Conservation Biology*, 18, 1435-1439.
- [10] BLANCO, C. (1994): "Bill on Outdoor Lighting Pollution Introduced by the Italian Astronomical Society to the National Government". En: MCNALLY, D. (ed.) *The Vanishing Universe: Adverse Environmental Impacts on Astronomy*. París: UNESCO.
- [11] BRENNAN, D. (1994): "The Edinburgh Lighting Vision". Summary. En: SCHREUDER, D. A. (ed.) *Urban Sky Glow, a Worry for Astronomy*. Viena: CIE.
- [12] BRUCATO, R. (1991): "Sky Preservation at Palomar Observatory". *Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris*. ASP Conference Series, 17, 20.
- [13] BRUDERER, B.; PETER, D.; STEURI, T. (1999): "Behaviour of Migrating Birds Exposed To X-Band Radar and a Bright Light Beam". *Journal of Experimental Biology*, 202, 1015-1022.
- [14] BRUNI, D. (1993): "City Light Pollution: Its Effect on Astronomy". *IAPPP Communications*, 53, 1-8.
- [15] CARRASCO, B. E.; CARRAMINANA, A.; SÁNCHEZ-SESMA, F. J.; LERMO, F. J. (1998) "Protection of the Observatorio Astrofísico Guillermo Haro". En: SYUZO, I.; TOMOHIRO, H. (eds.) *Preserving the Astronomical Windows*, 23rd General Assembly of the International Astronomical Union. Kyoto, Japón.

- [16] CHESTER, J. (1991): "The Impact of Light Pollution on Amateur Astronomy and Public Awareness of the Night Sky". Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris. ASP Conference Series, 17, 109.
- [17] CINZANO, P. (1993): References on Light Pollution and Related Fields. Padua: Dipartimento di Astronomia, Università di Padova.
- [18] CORDELL, F. M. (1993): "Fun With Lasers or Street Lamps I Have Known and Hated". IAPPP Communications, 51, 20-24.
- [19] COSTERO, R. (1991): "Light Pollution at the Astronomical Observatories in Mexico". Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris. ASP Conference Series, 17, 45.
- [20] CRAWFORD, D. L.; HUNTER, T. B. (1990): "The Battle Against Light Pollution". Sky and Telescope, 1, 23-29.
- [21] CRAWFORD, D. L. (1994): "Light Pollution: Theft of the Night". En: IAU (ed.) IAU/COSPAR/ICSU/UNESCO Meeting, Adverse Environmental Impacts on Astronomy: An Exposition. París.
- [22] DI SORA, M. (1993): "Light Pollution, Problems and Propositions (from Italy. a resolutive participation)". Memorie della Società Astronomica Italiana, 64, 173-177.
- [23] DOLSA, A. G.; ALBARRÁN, M. T. (1998): La problemática de la contaminación lumínica en la conservación de la biodiversidad. Barcelona: Departament de Medi Ambient, Generalitat de Catalunya.
- [24] ELVEY, C. T.; ROACH, F. E. (1937): "A Photoelectric Study of the Light From the Night Sky". The Astrophysical Journal, 85, 213-241.
- [25] FLETCHER, J. M.; CRAMPTON, D. (1973): "An Astronomical View of High-Pressure Sodium Lamps". Publications of the ASP, 85, 1-3.
- [26] GAL, G.; LOEW, E. R.; RUDSTAM, L. G.; MOHAMMADIAN, A. M. (1999): "Light and Diel Vertical Migration: Spectral Sensitivity and Light Avoidance by *Mysis relicta*". Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 56, 311-322.
- [27] GARSTANG, R. H. (1984a): "Improved Scattering Formula For Calculations of Artificial Night-Sky Illumination". The Observatory, 104, 196-197.
- [28] GARSTANG, R. H. (1984b): "Model For Artificial Night-Sky Illumination". Bulletin of the American Astronomical Society, 16, 904.
- [29] GARSTANG, R. H. (1985a): "Brightness of the Denver Night Sky Glow by Comparison with Moonlight". Announcer, American Association of Physics Teachers, 15, 54.
- [30] GARSTANG, R. H. (1985b): "Visibility of Stars in Daylight". Journal of the British Astronomical Association, 95, 133.



- [31] GARSTANG, R. H. (1986): "Model for Artificial Night-Sky Illumination". Publications of the ASP, 98, 364-375.
- [32] GARSTANG, R. H. (1988): "Predictions of Seasonal Variations in Night Sky Brightnesses". The Observatory, 108, 159-161.
- [33] GARSTANG, R. H. (1991): "Light Pollution Modeling". Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris. ASP Conference Series, 17, 56-69.
- [34] GARSTANG, R. H. (2006): "Brightness of Clouds at Night over a City". Bulletin of the American Astronomical Society, 38.
- [35] GREEN, D. W. E. (1997): "Some Additional Thoughts on Light Pollution". The Observatory, 117, 229-231.
- [36] GREEN, D. W. E. (1998): "Astronomers and Light Pollution". Sky & Telescope, 95, 10-11.
- [37] HÄNEL, A. (2002): The Situation of Light Pollution in Germany. Museum am Schölerberg, Natur und Umwelt, Planetarium.
- [38] HAYES, D. S.; LATHAM, D. W. (1975): "A Rediscussion of the Atmospheric Extinction and the Absolute Spectral-Energy Distribution of VEGA". Astrophysical Journal, 197, 593-601.
- [39] HOAG, A. A. (1972): "Observatories and City Lights - One City Fights Light Pollution". Mercury, 1, 2-3.
- [40] HOAG, A. A.: (1976) "City Sky-Glow Monitoring at Kitt Peak II". Publications of the ASP, 88, 207-208.
- [41] HOLMES, R. W. (1997): "The Purpose of Road Lighting". The Observatory, 117, 25-30.
- [42] HUNTER, T.; CRAWFORD, D. (1991): "The Economics of Light Pollution". Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris. ASP Conference Series, 17, 89-96.
- [43] IDA (2007): The International Dark-Sky Association. <<http://www.darksky.org>> (Fecha de consulta: 12 de abril de 2007).
- [44] JIANG, S. Y. (1991): "Environmental Conditions of Chinese Astronomical Observatories: Past, Present and Future". Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris. ASP Conference Series, 17, 33.
- [45] KALINOWSKI, J. K.; ROOSEN, R. G.; BRANDT, J. C. (1995): "The Night Sky Brightness at McDonald Observatory". Publications of the ASP, 87, 869-876.
- [46] KAWAKAMI, K.; ISOBE, S. (1998): "A Study of Luminous Intensity Distributions of Lighting Lamps". En: SYUZO, I.; TOMOHIRO, H. (eds.) Preserving the

Astronomical Windows. 23rd General Assembly of the International Astronomical Union. Kyoto, Japón.

[47] KOVALEVSKY, J. (1998): "Environmental Disturbances of Astronomical Observations". En: SYUZO, I.; TOMOHIRO, H. (eds.) Preserving the Astronomical Windows. 23rd General Assembly of the International Astronomical Union. Kyoto, Japón.

[48] LABOY, V. M. (2007): "El problema de la contaminación lumínica". Quebradillas, Puerto Rico: Escuela Superior Juan Alejo de Arizmendi.

[49] LARKIN, R. P.; SZAFONI, R. E. (2008): "Evidence for Widely Dispersed Birds Migrating Together at Night". Integrative and Comparative Biology, 48, 40-49.

[50] LINDLEY, D. (1998): "Keeping Astronomers in the Dark". Nature, 331, 205.

[51] LONGCORE, T.; RICH, C. (2004): "Ecological Light Pollution". Frontiers in Ecology and the Environment, 2, 191-198.

[52] LOUISTISSERAND, S.; BÜCHER, A.; KOUTCHMY, S.; LAMY, P. (1987): "Night Sky Optical Spectrum from a High Altitude Observatory". Astronomy & Astrophysics Supplement Series, 68, 539-543.

[53] MASSEY, P.; GRONWALL, C.; PILACHOWSKI, C. A. (1990): "The Spectrum of the Kitt Peak Night Sky". Publications of the ASP, 102, 1046-1051.

[54] MATTILA, K.; VÄSÄINEN, P.; VON APPEN-SCHNUR, G. F. O. (1996): "Sky Brightness at the ESO La Silla Observatory 1978 to 1988". Astronomy & Astrophysics Supplement Series, 119, 153-170.

[55] MOORE, M. V.; PIERCE, S. M.; WALSH, H. M.; KVALVIK, S. K.; LIM, J. D. (2000): "Urban Light Pollution Alters the Diel Vertical Migration of Daphnia". Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie, 27, 1-4.

[56] MURDIN, P.; SÁNCHEZ, F. (1987): "Protection of the Observatories of the Canary Islands". Identification, Optimization, and Protection of Optical Telescope Sites, 203-206.

[57] MURDIN, P. (1992): "Protection of Observatories: The Legal Avenues". The Protection of Astronomical and Geophysical Sites, 159-207.

[58] MURDIN, P. (1994): "The Aims of Astronomy in Science and the Humanities: Why Astronomy Must Be Protected". En: IAU (ed.) IAU/COSPAR/ICSU/ UNESCO Meeting, Adverse Environmental Impacts on Astronomy: An Exposition. París.

[59] MUSKOKA HERITAGE FOUNDATION (2008): Ecology of the Night. <<http://www.muskokaheritage.org/ecology-night/>> (Fecha de consulta: 3 de julio de 2008).



[60] OSTERBROCK, D. E.; WALKER, M. F.; KOSKI, A. T. (1976): "The Spectrum of Light Pollution at Mount Hamilton". Publications of the ASP, 88, 349-352.

[61] PERCY, J. R. (1998): "Preserving the Astronomical Windows by/for Education and Culture". En: SYUZO, I.; TOMOHIRO, H. (eds.) Preserving the Astronomical Windows. 23rd General Assembly of the International Astronomical Union. Kyoto, Japón.

[62] PUKKALA, E.; OJAMO, M.; RUDANKO, S. L.; STEVENS, R. G.; VERKASALO, P. K. (2006): "Does Incidence of Breast Cancer and Prostate Cancer Decrease with Increasing Degree of Visual Impairment". Cancer Causes Control, 17, 573-576.

[63] RAEVEL, P.; LAMIOT, F. (1998): Incidences de l'éclairage artificiel des infrastructures routières sur les milieux naturels. Région Nord – Pas-de-Calais: Direction Environnement, Énergie et Déchets.

[64] RAINE, H.; BORG, J. J.; RAINE, A.; BAIRNER, S.; CARDONA, M. B. (2007): Light Pollution and Its Effect on Yelkouan Shearwaters in Malta: Causes and Solutions. Malta: Bird Life Malta.

[65] RASC (2009): RASC Kingston Centre - Responsible Lighting. <<http://kingston.rasc.ca/Committees/lighting.php>> (Fecha de consulta: 10 de septiembre de 2009).

[66] RICH, C.; LONGCORE, T. (2006): Ecological Consequences of Artificial Night Lighting. Washington: Island Press.

[67] RIEGEL, K. W. (1973): "Light Pollution: Outdoor Lighting Is a Growing Threat to Astronomy". Science, 179, 1285-1291.

[68] SAN MARTÍN, R. (2003): "Contaminación lumínica en España". Revista de la Dirección Conservación de la Energía, 1, 12-14.

[69] SCHNEEBERGER, T. J.; WORDEN, S. P.; BECKERS, J. M. (1979): "The Night Sky Conditions at the Sacramento Peak Observatory, I - Sky Brightness". Publications of the ASP, 91, 530-532.

[70] SCHREUDER, D. (1991): Lighting Near Astronomical Observatories. Viena: CIE, Technical Committee.

[71] SMITH, F. G. (1982a): "Identification and Protection of Existing and Potential Observatory Sites". Transactions of the International Astronomical Union, 18, 667.

[72] SMITH, F. G. (1982b): "Identification and Protection of Existing and Potential Observatory Sites". En: WEST, R. M. (ed.) Proceedings of the 18th General Assembly of the International Astronomical Union. Patras, Grecia.

[73] SPERLING, N. (1991): "The Disappearance of Darkness". Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris. ASP Conference Series, 17, 101-108.



[74] TANNER, A. (1991): "Light Trespass". Light Pollution, Radio Interference, and Space Debris. ASP Conference Series, 17, 85-88.

[75] TREANOR, P. J. (1976): "A Simple Propagation Law for Artificial Night-Sky Illumination". The Observatory, 93, 117-120.

[76] VAN BERGEM-JANSEN, P. M.; VOS, J.; ALFERDINCK, J. W. A. M. (1996): Nuisance From Tennis-Court Lighting Experienced by Surrounding Residents. Informe nº TM-96-C070. Soesterberg: IZF/TNO.

[77] VAN DER BERGH, S. (1987): Identification and Protection of Existing and Potential Observatory Sites. International Astronomical Union.

[78] VAN DER BERGH, S. (1988): "Identification and Protection of Existing and Potential Observatory Sites". En: McNALLY, D. (ed.) Proceedings of the 20th General Assembly of the International Astronomical Union. Baltimore, Estados Unidos.

[79] WALKER, C., et al. (2003): Determinación de la contaminación lumínica en el cielo de Tucson, Arizona. Tucson: Departamento de Ciencias de la preparatoria Tucson High, la secundaria Vail y el programa de educación de NOAO.

[80] WALKER, M. F. (1970): "Light Pollution Model". Publications of the ASP, 82, 672.

[81] WALKER, M. F. (1976): Identification and Protection of Existing and Potential Observatory Sites. International Astronomical Union.

[82] WALKER, M. F. (1977a): "Identification and Protection of Existing and Potential Observatory Sites". En: MULLER, E. A.; JAPPEL, A. (eds.) Proceedings of the 16th General Assembly of the International Astronomical Union. Grenoble, Francia.

[83] WALKER, M. F. (1977b): "The Effects of Urban Lighting on the Brightness of the Night Sky". Publications of the ASP, 89, 405-409.

[84] WALKER, M. F.; CAYREL, R. (1979): Identification and Protection of Existing and Potential Observatory Sites. International Astronomical Union.

[85] WALKER, M. F. (1984): "High Quality Astronomical Sites Around the World". En: ARDEBERG, A.; WOLTIER, L. (eds.): Site Testing for Future Large Telescopes. La Silla, Chile.

[86] World Wildlife Fund (2010): My Earth Hour. <<http://www.myearthhour.org>> (Fecha de consulta: 2 de abril de 2010).

[87] WU, C.-H.; ANDERSON, J. M. M. (1997): "Novel Deblurring Algorithms For Images Captured With CCD Cameras". Journal of the Optical Society of America, 14, 1421-1430.



[88] XU, G. (2007): Double-Layer Film Structure Filming Glass Without Light Pollution. GuangZhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences.

Desarrollo e investigación de la modelación matemática de la CL

[1] ALBERS, S.; DURISCOE, D. (2001): "Modelling Light Pollution from Population Data and Implications for National Park Service Lands". *George Wright Forum*, 18, 56-68.

[2] AUBÉ, M.; FRANCHOMME-FOSSÉ, L.; ROBERT-STAEHLER, P.; HOULE, V. (2005): "Light Pollution Modelling and Detection in a Heterogeneous Environment: Toward a night time aerosol optical depth retrieval". En: SPIE (ed.) *SPIE2005*.

[3] BADDILEY, C. J. (2004): *Light Pollution in the UK*. British Astronomical Association, Campaign for Dark Skies.

[4] BERRY, R. L. (1976): "Light Pollution in Southern Ontario". *The Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 70, 3.

[5] BESSEL, M. S. (1990): "UBVRI Passbands". *The Astronomical Society of the Pacific, Publications* 102, 1181.

[6] ELVEY, C. T.; ROACH, F. E. (1937): "A Photoelectric Study of the Light from the Night Sky". *The Astrophysical Journal*, 85, 213-241.

[7] GARSTANG, R. H. (1984): "Improved Scattering Formula for Calculations of Artificial Night-Sky Illumination". *The Observatory*, 104, 196-197.

[8] GARSTANG, R. H. (1986): "Model for Artificial Night-Sky Illumination". *Publications of the ASP*, 98, 364-375.

[9] GREEN, D. W. E. (1992): "Magnitude Corrections for Atmospheric Extinction". *International Comet Quarterly*, 14, 55-59.

[10] HAYES, D. S.; LATHAM, D. W. (1975): "A Rediscussion of the Atmospheric Extinction and the Absolute Spectral-Energy Distribution of VEGA". *Astrophysical Journal*, 197, 593-601.

[11] HOUGHTON, J. T. (2002): *The Physics of Atmosphere*. Londres: Cambridge University Press.

[12] ISOBE, S.; KOSAI, H. (1998): "Star Watching Observations to Measure Night Sky Brightness". En: SYUZO, I.; TOMOHIRO, H. (eds.) *Preserving the Astronomical Windows*. 23rd General Assembly of the International Astronomical Union. Kyoto, Japón.

[13] KASTEN, F.; YOUNG, A. T. (1989): "Revised Optical Air Mass Tables and Approximation Formula". *Applied Optics*, 28, 4735-4738.



- [14] KOCIFAJ, M. (2007): "Light-Pollution Model for Cloudy and Cloudless Night Skies with Ground-Based Light Sources". *Applied Optics*, 15, 3013-3022.
- [15] LENOBLE, J. (1985): *Radiative Transfer in Scattering and Absorbing Atmospheres: Standard Computational Procedures*. A. Deepak Publishing.
- [16] MOHAN, V.; UDDIN, W.; SAGAR, R.; GUPTA, S. K. (1999): "Atmospheric Extinction at Devasthal, Naini Tal". *Bulletin of the Astronomical Society of India*, 27, 601.
- [17] NARISADA, K.; SCHREUDER, D. (2004): *Light Pollution Handbook*. Springer.
- [18] PIKE, R. (1976): "A Simple Computer Model for the Growth of Light Pollution". *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 70, 116-126.
- [19] PRAHL, S. A. (1988): *Light Transport in Tissue*. Texas: University of Texas at Austin.
- [20] SAN MARTÍN PÁRAMO, R.; GARCÍA GIL, M.; SOLANO LAMPHAR, H. A. (2009): "Metodología RAMAL-UPC para análisis cuantitativo de la CL". En: CEI (ed.) *Actas del XXXV Simposio Nacional de Iluminación*. Comité Español de Iluminación. Pontevedra, España.
- [21] SCHAEFER, B. E. (1987): "Extinction Angles and Megaliths". *Sky & Telescope*, 73, 426.
- [22] SCHAEFER, B. E.; BULDER, H. J. J.; BOURGEOIS, J. (1992): "Lunar Occultation Visibility". *Icarus*, 100, 60-72.
- [23] SHIRKEY, R. C. (2006): *A Model for Nighttime Urban Illumination*. Nuevo México: U.S. Army Research Laboratory, Computational and Information Sciences Directorate, Battlefield Environment Division.
- [24] SOLANO LAMPHAR, H. A.; SAN MARTÍN PÁRAMO, R. (2009): "Mathematical Model for the Measurement of Light Pollution". En: DAW (ed.) *2nd Bhartatiaya Vigyan Sammelan, Devi Ahilya Vishwavidyalaya*. Indore, India.
- [25] SOLANO LAMPHAR, H. A.; SAN MARTÍN PÁRAMO, R.; GARCÍA GIL, M. (2010): "Proposal Model for the Categorization of Night Sky Brightness in Natural Spaces Affected by Light Pollution". En: CIE (ed.) *Lighting Quality & Energy Efficiency CIE2010*. Viena.
- [26] STALIN, C. S.; ANUPAMA, G. C.; SAHU, D. K.; PRABHU, T. P.; BHATT, B. C.; PARIHAR, P. S.; HEGDE, M. (2008): "Night Sky at the Indian Astronomical Observatory during 2000-2008". *Bulletin of the Astronomical Society of India*, 36, 111-127.
- [27] TREANOR, P. J. (1973): "A Simple Propagation Law for Artificial Night-Sky Illumination". *The Observatory*, 93, 117-120.
- [28] TREANOR, P. J. (1974): *Artificial Night Sky Brightness in Italy*. Padua: OAN.
- [29] WALKER, M. F. (1970): "Light Pollution Model". *Publications of the ASP*, 82, 672.



[30] WALKER, M. F. (1977b): "The Effects of Urban Lighting on the Brightness of the Night Sky". *Publications of the ASP*, 89, 405-409.

[31] WOLFRAM, S. (2010): *Wolfram Research*. <<http://www.wolfram.com>> Fecha de consulta: 2 de febrero de 2010.

[32] ZOTTI, G. (2007): "Measuring Light Pollution with a Calibrated High Dynamic Range All-Sky Image Acquisition System". En: IDA (ed.) *DARKSKY 2007: 7th European Symposium for the Protection of the Night Sky*. Bled, Eslovenia.:

¹ La normativa y reglamentación mencionada en este apartado se puede consultar en: <<http://www.celfosc.org/biblio/legal/index.html>>.

