

04-026

MODELING LIGHT POLLUTION IN URBAN ENVIRONMENTS

Meléndez, Liliana; Sierra Garriga, Carlos; García Gil, Manuel
UPC

This paper aims to describe a methodology of calculation based on a vector analysis to characterize and simulate light pollution emitted by outdoor lighting installation in a particular case. The initial approach was performed, identifying pollution sources in a city, and classifying the case studies in terms of geometric place analyzed characteristics, the photometric characteristics of luminaires, Reflections flow pavement reflections side walls and the presence of street trees. Then the collected data were treated by computer, and simulations of case studies with the help of a lighting software calculation is performed. The values extracted in the previous step is processed considering the vector methodology proposed, and were plotted in a polar curve or resulting global photometry. The results obtained in developing this methodology allowed quantify, model and analyze the spatial distribution of the light intensity emitted in no useful addresses, caused by different types of artificial lighting facilities in terms of urban structure analyzed.

Keywords: *Light Pollution; photometr; urban enviroments*

MODELIZACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN LUMÍNICA EN ENTORNOS URBANOS

La presente ponencia tiene como objetivo describir una metodología de cálculo basada en un análisis vectorial, que permite caracterizar y simular la Contaminación Lumínica emitida por una instalación de alumbrado exterior en un caso determinado. Para ello se realizó un planteamiento inicial, identificando los focos contaminantes en una población, y clasificando los casos de estudio teniendo en cuenta: las características geométricas del lugar analizado, las características fotométricas de las luminarias, las reflexiones del flujo en pavimentos, las reflexiones en paredes laterales y la presencia de arbolado viario. Posteriormente los datos recogidos se trataron informáticamente, y se realizaron simulaciones de los casos de estudio con la ayuda de un programa de cálculo lumínico. Los valores extraídos en el paso anterior se procesaron teniendo en cuenta la metodología vectorial propuesta, y se graficaron en una curva polar o fotometría global resultante. Los resultados obtenidos al desarrollar esta metodología permitieron cuantificar, modelizar y analizar la distribución espacial de la intensidad luminosa emitida en direcciones no útiles, causado por los diferentes tipos de instalaciones de alumbrado artificial en función de la estructura urbana analizada.

Palabras clave: *Contaminación Lumínica; fotometría; entornos urbanos*

Correspondencia: Carlos Sierra carlos.sierra@upc.edu

1. Introducción

“Los cielos, que han sido y son una inspiración para toda la Humanidad, están empezando a desaparecer e, incluso, a resultar desconocidos para las generaciones más jóvenes. Se está perdiendo rápidamente un elemento esencial de nuestra civilización y cultura y esta pérdida afectará a todos los países de la Tierra”. Así se expresaban en una solemne declaración conjunta la UNESCO, la Unión Astronómica Internacional y el Consejo Mundial de la Ciencia (1992).

Aunque ha transcurrido veintidós años desde aquella declaración, hoy en día este recurso natural está más amenazado que nunca por el uso excesivo e irresponsable del alumbrado de exteriores. En la actualidad el deterioro en la observación del paisaje celeste se ha hecho aun más evidente, y para observar el firmamento debemos alejarnos de los núcleos urbanos, y aún así, los efectos de la “civilización iluminada” se extienden hacia las zonas deshabitadas de forma imparable (Rosales 2002).

Además de afectar las observaciones astronómicas, la contaminación lumínica se ha convertido ya en un problema ambiental y social de primer orden, con diversas consecuencias ecológicas, económicas, sobre la seguridad y la salud. Las últimas investigaciones indican que gran cantidad de ecosistemas, y seres vivos, pueden ver afectados su actividad debido a la pérdida de la oscuridad. (Froy, O., et al. 2003; Longcore, T., & Rich 2004; Montevecchi 2006; San Martín, P. R., et al. 2009).

En el aspecto ecológico la introducción de luz deteriora el paisaje nocturno, modificando los hábitats y alterando los ritmos biológicos a los seres vivos. Incluso a niveles lumínicos muy reducidos (inferiores al nivel lumínico correspondiente a la luz de la luna, se produce una repercusión importante a los comportamientos nocturnos (Gaston, K., et al. 2013). Estas repercusiones pueden aumentarse por los cielos nublados, más de 6 veces, debido al aumento de reflectancia de las partículas de agua en la atmósfera, y a su mayor tamaño (Kocifaj, M. & Solano 2014; Kyba, C. C., et al. 2011). Asimismo los alumbrados consumen ingentes cantidades de energía, lo que contribuye a la generación de residuos de larga duración radiactivos o de gases de efecto invernadero que tienen sus propios problemas ecológicos asociados, como lo es una importante contribución al cambio climático de origen antropogénico, y ocasionando un importante coste y derroche energético (Sánchez, A., et al. 2010). En este ámbito económico, se derrocha si se ilumina en exceso o hacia el cielo o cuando nadie lo necesita. En algunos casos el mal uso de la iluminación puede originar paralelamente problemas de seguridad vial y ciudadana que se pretende prevenir, pues aunque proporciona sensación de seguridad también produce con frecuencia fatiga visual, deslumbramientos, transiciones repentinas entre zonas en sombra y otras sobre iluminadas y una relajación de la alerta en la conducción contribuyendo a situaciones de riesgo (Dorreñochea 2013).

Lo expuesto anteriormente hace evidente la preocupación sobre esta problemática, llevando a algunos grupos de personas a profundizar sobre este tema, y al mismo tiempo a exigir leyes, ordenanzas y normativas para proteger el cielo nocturno, ejemplo de esto es el reglamento aprobado por la Generalidad de Cataluña que aplica la ley 6/2001, de 31 de Mayo, de ordenación ambiental y de iluminación para la protección del medio nocturno. La cual tiene como uno de sus puntos principales mantener en lo posible las condiciones naturales de las horas nocturnas, en beneficio de la fauna, la flora y los ecosistemas en general, de promover la eficiencia energética de los alumbrados exteriores; evitar la intrusión lumínica en el entorno doméstico y de prevenir y corregir los efectos de la contaminación lumínica en la visión del cielo (Parlament de Catalunya 2001).

Por otra parte, aunque el fenómeno de la contaminación lumínica es conocido desde los años 70, se ha visto muy incrementado debido al comportamiento social en el que se relaciona mayor cantidad e intensidad del alumbrado público con un mayor grado de desarrollo económico y tecnológico. Para cuantificar este fenómeno existen modelos matemáticos desarrollados desde los años 70 como los de Walker (1977) y Treanor (1973) que permiten calcular el grado de resplandor nocturno en función de una serie de constantes, la distancia a la fuente de emisión y el número de habitantes de la población, pero no tienen en cuenta el flujo instalado real, la tipología de las lámparas, ni los factores de reflexión característicos.

En los 90 se desarrollaron modelos más fiables, planteados por Cinzano y Diaz (2000) y por Garstang (1986), ya que tuvieron en cuenta más variables que los modelos anteriores. Estos últimos estudios incluían el flujo instalado en el alumbrado público, la cantidad de partículas en suspensión, la humedad relativa, entre otras variables, etc., determinando así de forma matemática el resplandor sobre la ciudad considerando su orografía local. (Aube, M., Franchomme, L., Robert, P., & Houle 2005; Kocifaj 2007; Garcia, M., & Lamphar 2010)

La Universidad Politécnica de Cataluña (Garcia, M., & Lamphar 2009; Garcia, M., & Lamphar 2010; San Martín, R., et al. 2012) desarrollo un modelo, en el que se calculaba de forma más detallada la cantidad de flujo lumínico contaminante (cantidad en lúmenes). Valorando parámetros como: Emisión de Flujo Superior (EFS) y Grado Relativo de Emisión (GRE), representando estos valores por zonas, calles, etc. Para el cálculo de estos parámetros se utilizó un programa de cálculo en el que realizaban simulaciones informáticas de casos tipos, teniendo en cuenta los datos reales de todas las situaciones (tipología de calles) y fuentes de contaminación (características específicas del alumbrado utilizado).

Aunque las metodologías planteadas en la actualidad ayudan a calcular la contaminación lumínica, y han sido de gran utilidad para comprender este fenómeno, después de analizarlas se hizo evidente la necesidad de plantear un nuevo modelo que ampliara el alcance de los ya existentes, y que no solo tuviera en cuenta como parámetro de evaluación, la magnitud del flujo contaminante emitido al medio, sino que además, aportara información suficiente para caracterizar la distribución espacial de la intensidad luminosa, información importante según demuestran los estudios realizados por Cinzano y Díaz(2000).

Por lo tanto la necesidad de emprender actuaciones para reducir la contaminación lumínica implica la conveniencia de desarrollar nuevos procesos luminotécnicos que ayuden a conocer, cuantificar, evitar y reducir de forma más precisa la incidencia de esta contaminación al momento de iluminar. Procesos útiles para conocer la magnitud de la incidencia y su prioridad de solución. Actualmente el enlace entre sistemas de alumbrado y contaminación lumínica se hacen mediante enlaces muy débiles: Como el “número de Garstang”, por ejemplo, que asigna un valor medio de 1000 lúmenes/habitante a una determinada ciudad. Este método es claramente inexacto y no sirve de herramienta para evaluar diferentes proyectos de ingeniería (Narisada, K., & Schreuder 2004). Algunos avances se han producido con la cuantificación del flujo lumínico (Estrada, R., et al. 2015), pero todavía no se conoce la forma de la salida del flujo lumínico de las ciudades; flujo lumínico que es la fuente de la contaminación lumínica.

El objetivo de la investigación es conocer mejor la salida lumínica de las calles de las ciudades. Salida lumínica que se comporta como una fotometría de una luminaria al igual que un sólido fotométrico. La visión suficientemente alejada de la ciudad, ocasiona que la suma de las fotometrías de los diferentes casos analizados se sumen en una sola fotometría de la ciudad: objetivo final de la investigación.

Para ello se va a realizar una muestra de la metodología mediante la realización de una serie de cálculos luminotécnicos de alumbrado público exterior en un municipio, y la consideración luminotecnica y extracción de resultados para conseguir este fin.

2. Metodología

La metodología propuesta en este artículo está basada en un análisis vectorial, que cuantifica, modeliza y analiza la distribución espacial de la intensidad luminosa emitida en direcciones no útiles, causado por los diferentes tipos de instalaciones de alumbrado artificial. Esta metodología, evolución de otras existentes, ha sido desarrollada por el departamento de proyectos de ingeniería de la Universidad Politécnica De Cataluña, y plantea una serie de directrices que sirven para analizar los posibles casos de estudio que pueden presentarse en un núcleo urbano, pautas que pueden ayudar a determinar la incidencia que las diferentes variables presentes en cada uno de ellos, ejerce sobre la caracterización de la intensidad luminosa contaminante. Variables como las características geométricas y reflexivas del lugar analizado, características fotométricas de las luminarias y disposición de estas en el espacio, la presencia de arbolado viario, la regulación de los niveles de iluminación y por último el azimut de cada uno de los casos de estudio respecto al norte geográfico.

En el análisis se utiliza un software de cálculo lumínico, en el que se representa la ciudad analizada, a partir de la consideración de sus tipos de espacios urbanos, sistemas de alumbrado público y su posible afectación medio ambiental. Para realizar estas simulaciones se utiliza en concreto el apartado de interiores de dicho programa de cálculo, ya que este módulo permite tener en cuenta la incidencia que tiene la reflexión en las diferentes superficies (suelo y fachada de los edificios). Por otra parte para representar el alumbrado privado como los anuncios, los carteles publicitarios, y los aparadores..., se propone la utilización de fluorescentes de cierre opal, que proporcionan una distribución Lambertiana (San Martín, Gil & Lamphar. 2009).

Los resultados obtenidos en el paso anterior se correlacionaron con las variaciones aplicadas a las diferentes variables presentes en cada caso de estudio, determinando así la incidencia que estas tienen sobre la distribución espacial de intensidad luminosa contaminante.

A continuación se exponen brevemente las directrices propuestas por esta metodología, pautas que ayudan a caracterizar y simular la intensidad luminosa, emitido por una instalación de alumbrado exterior en un caso determinado.

2.1 Estudio del Caso de Análisis

Para realizar un planteamiento inicial e identificar los focos contaminantes en una población es necesario contemplar una serie de parámetros que proporcionen una visión global del escenario lumínico. Por ello se propone clasificarlos teniendo en cuenta las características urbanísticas y del alumbrado.

Los parámetros utilizados para realizar la clasificación de los casos de estudio son los siguientes:

Tabla 1: Parámetros utilizados para realizar la clasificación de los casos de estudio

Características urbanísticas del caso de estudio	Características del alumbrado del caso de estudio
Nombre del caso a estudiar	Numero de farolas
Tipo de calle	Disposición del alumbrado
Longitud de la vía publica	Separación de los puntos de luz
Amplitud de la vía publica	Altura de los puntos de luz

Altura de los edificios	Tipos de luminaria
Separación de los edificios con vía pública	Tipos de lámpara
Tipos de fachada (Izquierda)	Potencia de la lámpara
Tipos de fachada (Derecha)	Flujo lumínico de la lámpara
Porcentaje de ocupación	Nivel de alumbrado privado
Arbolado Viario	Iluminación media actual
	Tipos de alumbrado
	Regulación del nivel luminoso

Por otra parte para realizar la clasificación de los focos contaminantes en una población, no solo se tuvo en cuenta su estructura morfológica, sino que además se clasificaron considerando también el azimut de cada uno de los casos, ósea la orientación de cada caso de estudio respecto al norte geográfico. Y para determinar la magnitud del azimut de cada caso aplicamos la fórmula inversa propuesta por Thaddeus Vincenty (1975), quien propone un algoritmo muy eficiente, para el cálculo de la distancia entre dos puntos de la superficie de un elipsoide de revolución.

3. Simulación Informática de los Casos Tipo

Esta fase consiste en la informatización de los casos tipo, es decir realizar simulaciones informáticas teniendo en cuenta: las características geométricas de las calles, la distribución fotométrica de las luminarias, el tipo de lámparas y la zona de implantación, la regulación en los niveles de iluminación, las reflexiones del flujo en pavimentos y las reflexiones en paredes laterales, y por último el arbolado viario presente en cada caso.

Para la informatización de los casos fue preciso utilizar un software de planificación de alumbrado (Dialux 2014) , como hemos mencionado empleamos el apartado de interiores, ya que este permite tener en cuenta, la incidencia que tiene la reflexión en las diferentes superficies sobre el flujo lumínico que se escapa al cielo. Además gracias a la aplicación vectorial que posee el programa de cálculo, se determinó; la distribución fotométrica de las intensidades emitidas en direcciones no útiles.

3.1 Delimitación de la Zona de Análisis en los Casos Tipo

Para poder simplificar el análisis de cada uno de los casos se plantea dividirlos en tramos, ya que los resultados obtenidos en esta porción del estudio pueden extrapolarse al resto de la calle teniendo en cuenta sus características simétricas. Cada tramo estará representado generalmente por una o dos luminarias de la vía pública.

La zona de estudio o de análisis está conformada por:

- Rejillas de cálculo: las cuales proporcionan información sobre los niveles de iluminación que llega a cada uno de los elementos físicos (Suelo, Fachada, Cielo...).
- Y por una superficie mallificada, la cual proporciona información sobre la distribución de la intensidad luminosa contaminante en el espacio, la zona que abarca esta superficie se posiciona teniendo en cuenta el porcentaje de ocupación de cada caso.

Figura 1: Esquema de la situación del espacio simulado en una situación real de análisis

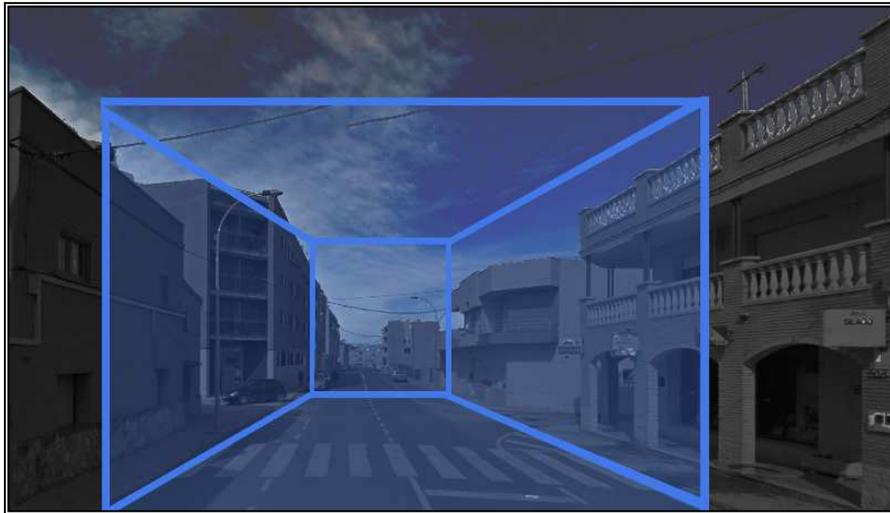


Figura 2: Vista en planta y en perspectiva de un caso tipo con un porcentaje de ocupación del 0%.

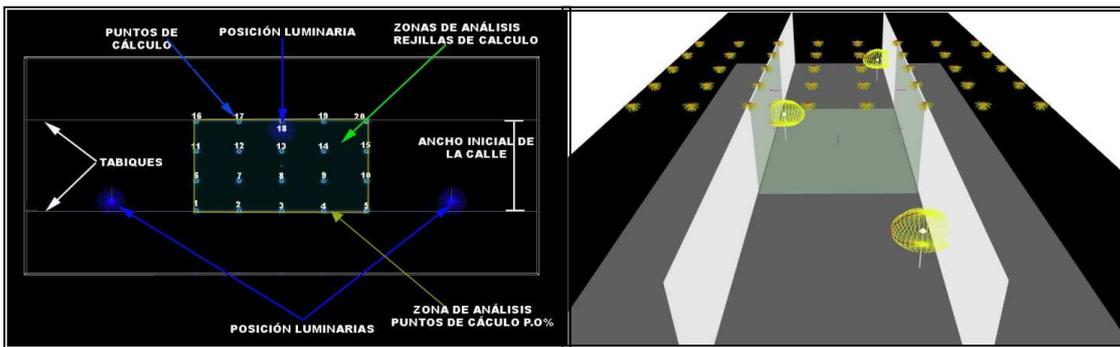
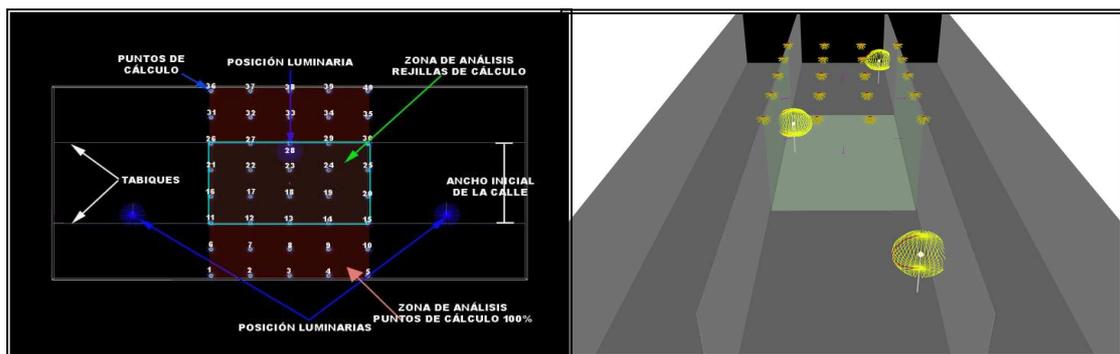
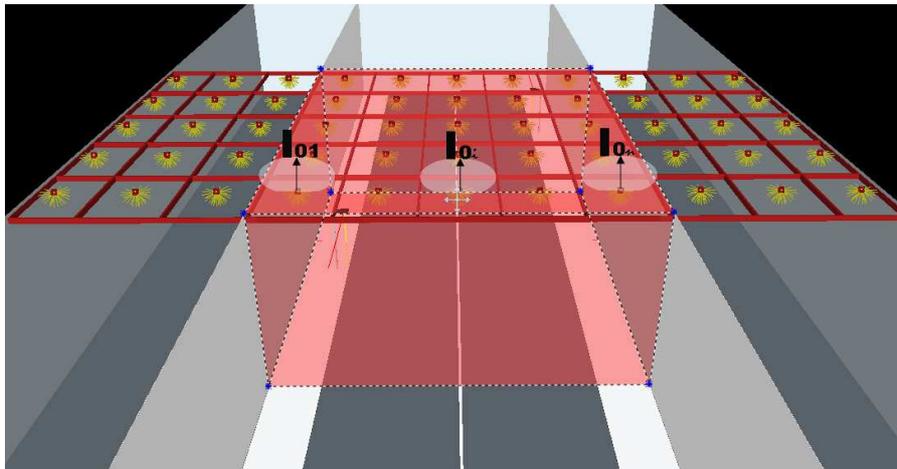


Figura 3: Vista en planta y en perspectiva de un caso tipo con un porcentaje de ocupación del 100%.



Como hemos mencionado con anterioridad, para determinar la distribución de la intensidad luminosa en un caso de estudio, es necesario emplear una superficie mallificada, donde cada una de las mallas es lo suficientemente pequeña para considerarse un emisor con una distribución parecida a la distribución de Lambert. Y para determinar dicha distribución es necesario posicionar vectores de cálculo en el centro geométrico de cada uno de las mallas.

Figura 4: Representación de la superficie mallificada en un caso tipo con porcentaje de ocupación del 0%



La orientación de los vectores de cálculo se determina tomando como referencia el sistema de representación C- γ , pero variando algunos conceptos, este sistema de coordenadas establece que el eje polar es vertical (IDAE; CEI 2001), y como la superficie que representa el cielo se considera horizontal, el ángulo de incidencia de un rayo luminoso en cualquier punto de esta superficie será $\langle\langle\gamma\rangle\rangle$, es decir, los ángulos de elevación de los planos verticales se representan por $\langle\langle\gamma\rangle\rangle$ y se miden tomando como vértice el centro fotométrico; para adaptar este concepto a nuestra investigación consideramos que $\gamma=0^\circ$ representa eje vertical hacia arriba. Y por ende $\gamma=180^\circ$ representa el eje vertical hacia abajo. Por otra parte los planos verticales $\langle\langle C \rangle\rangle$ giran alrededor del eje de rotación o eje polar, y el otro concepto que modificamos es el de rotación de estos planos respecto a un punto de referencia y que explicamos a continuación: Los planos verticales $\langle\langle C \rangle\rangle$ giran en torno al centro geométrico que se estableció al idealizar a la ciudad como un área circular contaminante, y la apertura de el ángulo se mide en el sentido de las agujas del reloj, desde el norte. Por ende de cara a la simulación informática la orientación de los planos $\langle\langle C \rangle\rangle$ estará determinada por el azimut del caso tipo respecto al norte geográfico.

4. Extracción de los Resultados

Teniendo en cuenta el enfoque que se aplica en el apartado anterior es necesario dividir el tratamiento de los resultados en dos fases:

4.1 Rejillas de cálculo:

Basándose en los datos obtenidos en las rejillas de cálculo se propone extraer los siguientes parámetros:

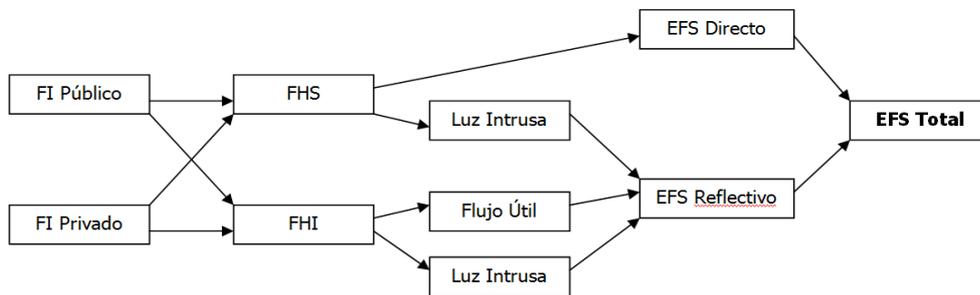
- Rejillas de Cálculo: las cuales proporcionan información sobre los niveles de iluminación que llega a cada uno de los elementos físicos (Suelo, Fachada, Cielo...).
- Emisión de Flujo Superior (EFS): Es la totalidad de flujo lumínico emitido hacia la bóveda celeste, es decir el flujo que se escapa de las características urbanísticas de una calle o zona y que llega a la parte superior del habitáculo, ósea la superficie que representa el cielo.

Su unidad es el lúmen, y tiene en cuenta:

- Luz emitida directamente por las luminarias hacia el cielo (porción del FHS)

- Flujo reflejado por el suelo u otros elementos donde incida la luz artificial.
- Disposición y geometría de la zona iluminada, que puede condicionar la cantidad real de flujo que escapa hacia el cielo
- Luz en la Vía Pública: Es el flujo lumínico considerado como útil, ya que es aprovechado para su uso ideal, el de iluminar la vía.
- Luz Intrusa: Flujo lumínico que incide en las paredes o fachadas de los edificios y que provoca intrusión luminosa a través de las ventanas.

Figura 5. Esquema que representa como se divide el flujo emitido en el análisis (San Martín, García & Solano, 2009).



4.2 Vectores de Cálculo

Basándose en los datos obtenidos en los vectores de cálculo se propone extraer los siguientes parámetros:

- Cálculo de las Intensidades:

Para definir la intensidad luminosa se parte del supuesto que; el caso de estudio es una fuente puntual teniendo en cuenta una distancia determinada. Y por lo tanto la distribución luminosa de esta magnitud se considera esférica en dirección radial.

$$I_0 = \Phi / 4\pi \quad (1)$$

$$\Phi_{0i} = E_{0i} \times S \quad (2)$$

$$I_{0i} = (E_{0i} \times S) / 4\pi \quad (3)$$

I_0 : Intensidad media esférica

Φ : Flujo

E : Iluminancia

S : Superficie de cálculo

Reemplazando la fórmula inicial (1) podemos determinar la densidad del flujo emitido por la fuente puntual en una dirección determinada, teniendo en cuenta la iluminancia obtenida en cada una de las direcciones del espacio, es decir los valores obtenidos (Lux) considerando los planos verticales $\langle\langle C \rangle\rangle$ y el ángulo de incidencia $\langle\langle \gamma \rangle\rangle$.

Por otra parte se contempla como superficie de cálculo las dimensiones que corresponden a la zona de análisis o de estudio donde se posicionan los puntos de cálculo. Es importante mencionar que esta zona de estudio varía en función del porcentaje de ocupación, es decir cuando el porcentaje de ocupación es del 0% la zona de estudio para los puntos de cálculo comprende todo el ancho del espacio simulado, en cambio cuando el porcentaje es del 100% la zona de estudio está delimitada por la rejilla de cálculo que representa el cielo.

- Representación de los Resultados Obtenidos al Agrupar los Vectores de Cálculo en una Curva Polar

Finalmente los resultados que se obtienen al agrupar y procesar los vectores de cálculo nos ayudan a obtener los valores para graficar una curva polar, dicha curva proporciona información sobre, la distribución fotométrica del flujo lumínico contaminante emitido a la bóveda celeste.

Para graficar estos valores se aplica el criterio que se utiliza al graficar la curva polar pero matizando el concepto:

- El ángulo C indica el plano vertical y $\langle\langle\gamma\rangle\rangle$ mide la inclinación respecto al eje vertical de la luminaria. Y como mencionamos anteriormente $\gamma=0^\circ$ representa eje vertical hacia arriba
- Los radios representan el ángulo $\langle\langle\gamma\rangle\rangle$ y las circunferencias concéntricas el valor de la intensidad en candelas.
- Y por último el otro concepto que matizamos es la orientación de los planos $\langle\langle C\rangle\rangle$, como hemos comentado anteriormente los orientamos respecto al norte geográfico, donde se definen los ángulos $C=0^\circ$ y $C=180^\circ$ con un azimut de 0° respecto al norte geográfico.

Para representar los resultados es necesario utilizar un software de diseño asistido por ordenador que permite realizar dibujos en dos y tres dimensiones (AutoCAD 2009). Se dibuja en un plano la Intensidad luminosa en forma de radios vectores en una dirección determinada y uniendo los extremos de estos radios vectores se tiene la curva de distribución polar de un caso tipo, cuyos valores parten de un punto único considerado el centro geométrico (Espín Estrella et al. 2009).

En la siguiente tabla se expone un ejemplo comparativo de un caso de estudio donde solo varía la tipología de luminaria y se puede apreciar las diferencias entre las intensidades.

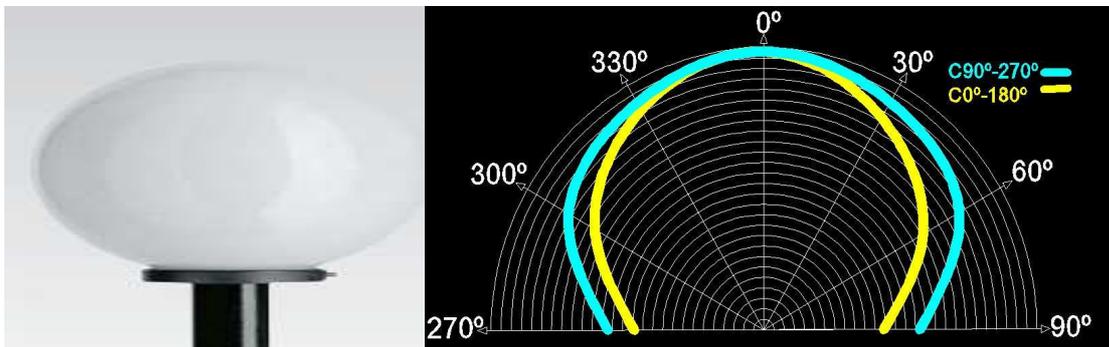
Tabla 2: Ejemplo comparativo de un caso de estudio

Planos C – ángulo γ	Tipología de luminaria A	Tipología de luminaria F	Valores relativos respecto a La luminaria A
	Intensidad (cd) ct1 p.o 0%	Intensidad (cd) ct4 p.o 0%	
C(90°-270°)- $\gamma 90^\circ$	2318	913	39%
C(90°-270°)- $\gamma 120^\circ$	3347	1593	48%
C(90°-270°)- $\gamma 150^\circ$	3763	2197	58%
C(90°-270°)- $\gamma 180^\circ$	3991	2498	63%
C(90°-270°)- $\gamma 210^\circ$	3763	2197	58%
C(90°-270°)- $\gamma 240^\circ$	3347	1593	48%

C(90°-270°)- γ 270°	2318	913	39%
C(0°-180°)- γ 90°	1784	724	41%
C(0°-180°)- γ 120°	2728	1451	53%
C(0°-180°)- γ 150°	3501	2162	62%
C(0°-180°)- γ 180°	3991	2498	63%
C(0°-180°)- γ 210°	3642	2194	60%
C(0°-180°)- γ 240°	2898	1494	52%
C(0°-180°)- γ 270°	1927	759	39%

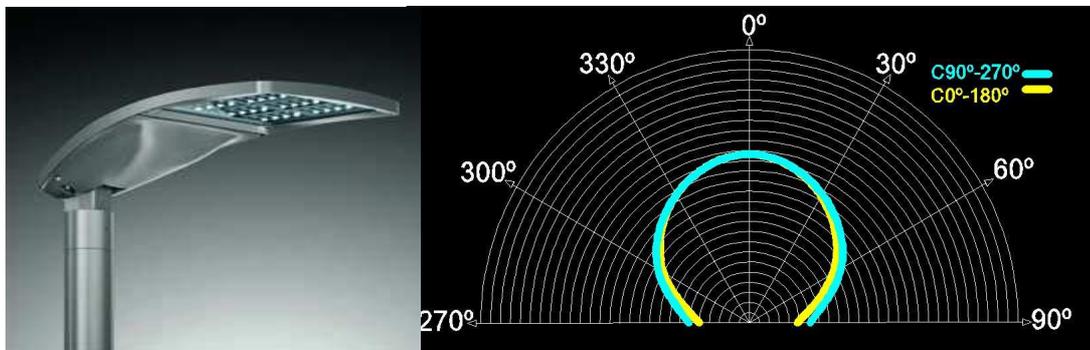
Nota: Ejemplo comparativo de un caso de estudio donde solo varía la tipología de luminaria y se aprecia las diferencias entre en las intensidades.

Figura 6: Diferente intensidad lumínica en fusión del ángulo



Nota: Tipología de luminaria A

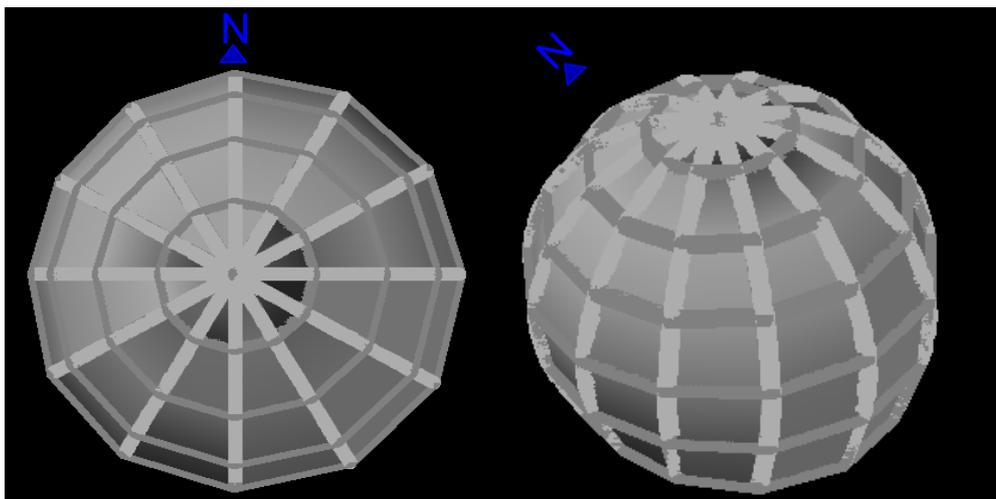
Figura 7: Diferente intensidad lumínica en fusión del ángulo



Nota: Tipología de luminaria F

Y por ultimo para graficar el sólido fotométrico en 3D se representa las intensidades en el espacio y se unen los extremos de los radios vectores. Para hacer una representación de los planos en tres dimensiones utilizando el AutoCAD se simula la posición de los planos «C» colocándolos en vertical y rotándolos en torno al centro geométrico según su ángulo.

Figura 8: Vista 3D en planta y en perspectiva de los planos verticales «C».



5. Conclusiones

Este modelo representa una aportación importante en el análisis y comprensión de la contaminación lumínica, ya propone una aplicación metodológica de fácil utilización, y en la que se valoran parámetros que inciden en este fenómeno.

Asimismo podemos destacar que una de las aportaciones más relevantes es la caracterización de la distribución fotométrica de la luz al determinar las intensidades en cada una de las direcciones del espacio, a través de simulaciones y análisis informáticos del caso de estudio, y utilizando una metodología vectorial que tiene en cuenta la forma elipsoidal de la tierra.

Además el desarrollo metodológico de este modelo, constata la incidencia que los diferentes parámetros presentes en un caso de estudio, tienen sobre la caracterización del flujo lumínico contaminante, es decir que la distribución espacial de dicho flujo se determina no solo por la magnitud de las instalaciones sino también, por las características fotométricas, factores de forma y reflexión de los espacios iluminados presentes en un caso. Parámetros reales que se ajustan a la realidad de los casos estudiados.

6. Referencias Bibliográficas

- Aube, M., Franchomme, L., Robert, P., & Houle, V. (2005). Light pollution modelling and detection in a heterogeneous environment: toward a night-time aerosol optical depth retrieval method. In *Optics & Photonics*, pp.589012–589012.
- AutoCAD Autodesk. (2009). AutoCAD.
- Cinzano, P. & Diaz Castro, F.J. (2000). The artificial sky luminance and the emission angles of the upward light flux. *Memorie della Societa Astronomica Italiana*, 71, p.251. Available at: <http://adsabs.harvard.edu/full/2000MmSAI..71..251C>.
- Dialux, 2014. Dialux 4.12. (2014). Available at: <http://www.dial.de/DIAL/es/home.html>.
- Dorremocha, C.H. (2013). Derecho a las estrellas: cultura espacial y calidad del cielo nocturno. In Madrid: III SEMINARIO SOBRE ACTIVIDADES ESPACIALES Y DERECHO.
- Espín, E. A., Fernando, A. D., Manzano, E., & Espin, M. (2009). *Luminotecnia básica para ingenieros*. Granada, Universidad de Granada.

- Estrada, R., García, M., Acosta, L., Bará, S., Sanchez A., & Zamorano, J. (2015). Statistical modelling and satellite monitoring of upward light from public lighting. *Lighting Research and Technology*.
- Froy, O., Gotter, A. L., Casselman, A. L., & Reppert, S.M. (2003). Illuminating the Circadian Clock in Monarch Butterfly Migration. *Science*, 300(5623), pp.1303–1305.
- García, M., & Lamphar, H. (2010). Quantification and assessment of the energy waste due to obstructive light, research methodology and analysis. *Lighting Quality&Energy Efficiency*.
- García, M., & Lamphar, H. (2009). Quantification and assessment of the energy waste due to obstructive light. *Research Methodology and analysis. Lighting Quality and Energy Efficiency*.
- Garstang, R.H. (1986). Model for artificial night-sky illumination. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 98, p.364. Available at: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1986PASP...98..364G>.
- Gaston, K., Bennie, J., Davies, T., & Hopkins, J. (2013). The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal. *Biol Rev Camb Philos Soc*, 88(4), pp.912–927.
- IDAE; CEI. (2001). *Guía Técnica de Eficiencia Energética en Iluminación*.
- Kocifaj, M. (2007). Light-pollution model for cloudy and cloudless night skies with ground-based light sources. *Applied optics*, 46(15), pp.3013–3022.
- Kocifaj, M., & Solano, H. (2014). Quantitative analysis of night skyglow amplification under cloudy conditions. *Journal of astronomical society*, 443, p.12.
- Kyba, C. C., Ruhtz, T., Fischer, J., & Hölker, F. (2011). Cloud Coverage Acts as an Amplifier for Ecological Light Pollution in Urban Ecosystems. *PloS one*, 6(3), p.e17307.
- Longcore, T., & Rich, C., 2004. Ecological light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2(4), pp.191–198.
- Montevicchi, W.A. (2006). Influences of artificial light on marine birds. In *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*. Washington, D.C.: Island Press, pp. 94–113.
- Narisada, K., & Schreuder, D., 2004. *Light pollution handbook*, Netherlands: Springer Science & Business Media.
- Parlament de Catalunya. (2001). *Leei d'ordenació ambiental de l'enllumenament per a la protecció del medi nocturn*, Butlletí Oficial del Parlament de Catalunya, del 28 de maig de 2001, núm. 187.
- Rosales, A.P. (2002). El problema de la contaminación lumínica. Web “Cielo Oscuro.” Available at: http://www.astrogranada.org/cieloscuro/htm/que_es_cl.htm#inicio_pag.
- San Martín Páramo, R., García Gil, M. & Solano Lamphar, H. (2009). Metodología RAMAL-UPC para análisis cuantitativo de la contaminación lumínica. In CEI, ed. *Pontevedra, España: XXXV Simposio nacional de iluminación. Comité español de iluminación*. Available at: <http://upcommons.upc.edu/e-prints/handle/2117/8854> [Accessed April 25, 2014].
- San Martín, P. R., Lamphar, H., García, M., & Ferrero, A.L. (2009). Contaminación lumínica en espacios naturales. *Investigación en el Parque Natural del Delta del Ebro*. In XXXV Simposium Nacional de Alumbrado.
- San Martín, R., García, M., Lamphar, H., & Francia Payàs, P. (2012). *Contaminación lumínica. Una visión desde el foco contaminante: El alumbrado artificial.*, Barcelona: Iniciativa Digital Politécnica.
- Sánchez, A., Zamorano, J., Pila, B., Rubio, J., Ruiz, R., Rodríguez, I., & González, A. (2010). *Contaminación Lumínica en España 2010*. In IX Meeting of the Spanish Astronomical Society. Madrid: SEA.
- Treanor, P.J. (1973). A simple propagation law for artificial night-sky illumination. *The Observatory*, Vol. 93, pp.117–120.

- UNESCO, la Unión Astronómica Internacional, el C.M. de la C. (1992). Declaración sobre la reducción de impactos ambientales adversos para la astronomía. Available at: <http://www.celfosc.org/biblio/general/herranz2013.pdf>.
- Vincenty, T. (1975). Direct and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with application of nested equations. Survey review, no 176, pp.88–93.
- Walker, M.F. (1977). The effects of urban lighting on the night sky. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 89(June), pp.405–409. Available at: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1977PASP...89..405W>.

