

## CASO PRÁCTICO

# Generación de mapas de luminancia urbana a partir de un sensor hiperespectral VNIR y una cámara fotogramétrica digital

Pipia, L., Alamús, R., Tardà, A., Pérez-Aragüés, F., Palà, V., Corbera, J., Arnaldich, J.

*Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), Parc de Montjuïc s/n, 08038 Barcelona, España.*

---

**Resumen:** Esta comunicación presenta una metodología para la generación de mapas de luminancia de alta resolución a partir de imágenes simultáneas hiperespectrales VNIR y fotogramétricas. La integración de la radiancia hiperespectral a nivel de suelo, ponderada según la curva de visión fotópica, más una estrategia de calibración cruzada de sensores, permiten por primera vez la descripción cuantitativa del flujo luminoso de altísima resolución espacial y con posibilidad de extensión a geometría multiangular. Desde el punto de vista práctico, esta metodología hace posible el seguimiento de las acciones adoptadas para mejorar la gestión de la iluminación urbana y cuantificar su resultado en términos de eficiencia energética.

**Palabras clave:** Contaminación lumínica, hiperespectral, VNIR, cámara fotogramétrica digital, luminancia.

## Hyperspectral VNIR and photogrammetric data fusion approach for urban luminance map generation

**Abstract:** This paper puts forward a methodology for the generation of high resolution luminance maps from simultaneous hyperspectral VNIR and photogrammetric imagery. The integration of hyperspectral radiance at ground level, properly weighted by the photopic-based coefficients, plus a sensor fusion strategy, provides for the first time a quantitative description of the luminous flux at high spatial resolution and with multi-angle geometry. Accordingly, this methodology allows following up any strategic policy aimed to improve urban illumination management and quantifying its effects in terms of energetic efficiency.

**Key words:** Light pollution, hyperspectral, VNIR, digital photogrammetric camera, luminance.

---

## 1. Introducción

La contaminación lumínica nocturna es un efecto colateral de la civilización industrial y se refiere habitualmente a la excesiva luz artificial procedente de la iluminación exterior e interior de edificios, publicidad, comercios, oficinas, instalaciones deportivas y, especialmente, el alumbrado público de las calles.

En los últimos años, un creciente debate sobre la eficiencia y el ahorro energético ha ido enfatizando la importancia de monitorizar el nivel de iluminación nocturna, tanto a escala local como regional y global. Por una parte, se persigue una reducción de los costos en la iluminación pública o privada, así como una disminución del impacto sobre el medioambiente. Por otra parte, se pretende

\* Autor para la correspondencia: [luca.pipia@icgc.cat](mailto:luca.pipia@icgc.cat)

estudiar de forma más rigurosa el efecto que los picos de radiancia espectral ultravioleta emitidos por los diferentes tipos de alumbrado pueden tener sobre el ciclo circadiano de los seres humanos (Gaston, 2015). En ambos casos, resulta crucial disponer de una herramienta capaz de describir cuantitativamente la cantidad de luz artificial radiada a nivel de suelo.

La función de luminosidad fotópica, definida por la *Commission Internationale de l'Éclairage* (CIE), describe la sensibilidad espectral promedio de la percepción visual humana al brillo de una fuente luminosa para las diferentes longitudes de onda. Es imprescindible entonces que los instrumentos utilizados para medir la cantidad de luz en una zona determinada sean capaces de reconstruir la respuesta del ojo humano. Desde este punto de vista, los sensores hiperespectrales que operan en el visible e infrarrojo cercano (en inglés *Visible-Near Infrared* o VNIR) son dispositivos muy versátiles, pues combinan las ventajas de una visión sinóptica de la superficie terrestre, cuando están a bordo de aviones o satélites, con una descripción detallada de la energía irradiada desde la zona observada en las diferentes regiones espectrales.

La literatura muestra que los sensores multispectrales e hiperespectrales aeroportados pueden ser utilizados para el análisis de adquisiciones nocturnas, aunque los trabajos publicados hasta ahora se centran más en la detección de las fuentes de emisión de luz artificial y en la clasificación basada en las diferencias espectrales de los diferentes tipos de iluminación (Tardà et al., 2012; Barducci et al., 2006). En cambio, los estudios basados en imágenes nocturnas satelitales están dirigidos al análisis de la huella urbana a escala regional y global (Kyba et al., 2015; Naom et al., 2014). Esto es debido, por un lado, a las escasas bandas que los satélites ofrecen para la identificación de las firmas espectrales de las fuentes de luz y, por otro lado, a su baja resolución espacial (unos 3 km para DMSP, 740 m para VIIRS) y al limitado rango dinámico de los sensores actualmente operativos. Cabe destacar que en ninguno de estos estudios se establece una caracterización cuantitativa del flujo luminoso para las imágenes nocturnas, por lo que hasta ahora no se ha dispuesto de ningún descriptor adecuado para realizar un seguimiento de las acciones adoptadas tanto desde el punto de vista

de la gestión de la iluminación urbana como de su resultado en términos de eficiencia energética.

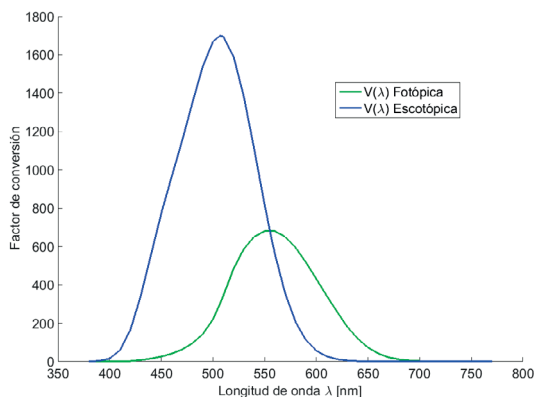
Con el objetivo de cubrir este último aspecto, el Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC) ha desarrollado una metodología para la caracterización cuantitativa del flujo luminoso a escala local en base al proceso de imágenes nocturnas captadas simultáneamente con un sensor hiperespectral AisaEAGLE-II junto con una cámara fotogramétrica digital DMC. Este artículo describe dicha metodología y presenta una primera validación con datos reales para su aplicación a nivel operativo.

## 2. Recuperación de luminancia con datos hiperespectrales aeroportados

Los sensores hiperespectrales que operan en el espectro visible e infrarrojo cercano (VNIR) proporcionan una descripción de la radiación electromagnética de un objeto observado en un número de bandas distribuidas uniformemente entre 400 nm y 1000 nm. A bordo de aviones o satélites, éstos combinan las ventajas de una visión sinóptica de la superficie terrestre con un muestreo de la energía irradiada desde la zona observada en las diferentes regiones espectrales.

Con el propósito de convertir la información de radiancia en luminancia, es preciso introducir el concepto de función de luminosidad, que describe la sensibilidad espectral media de la percepción visual humana al brillo de una fuente. Como ésta cambia dependiendo de las condiciones de iluminación, se habla de visión fotópica para aproximar la respuesta del ojo humano a los niveles de luz diurnos, y de visión escotópica para niveles muy bajos de luz. La Figura 1 muestra la función de luminosidad  $V(\lambda)$  establecida por la CIE para convertir la energía radiante en energía luminosa en el caso de visión fotópica y escotópica. En este artículo se hace siempre referencia al caso fotópico, que corresponde al tipo de visión contemplado en las normativas que definen los niveles de iluminación del alumbrado público (Real Decreto 1890/2008).

Dado que nos interesa medir la luminancia de las fuentes de luz artificial a nivel del suelo, se hace necesario tener en consideración el efecto de la atmósfera sobre la radiancia espectral en su camino



**Figura 1.** Curvas correspondientes a las funciones fotópica (verde) y escotópica (cian) de conversión de radiancia hiperspectral en información luminosa definidas por CIE.

hacia el sensor. Con el objetivo de evitar cualquier fuente luminosa adicional indeseada, es fundamental seleccionar ventanas horarias en las que la luna esté situada por debajo del horizonte, o bien operar durante fases de luna nueva. Además, cabe destacar que el uso de una plataforma aérea permite escoger el momento de vuelo y llevar a cabo el proceso de adquisición en condiciones de visibilidad ideal, con lo que los efectos atmosféricos presentes en cada banda hiperspectral se pueden modelizar como combinación de un término de atenuación de la radiación artificial generada a nivel de superficie y de una componente adicional de dispersión por aerosoles. Bajo estas hipótesis, es posible expresar la radiación espectral  $L$  que recibe el sensor  $S$  para una longitud de onda específica  $\lambda$  en función de la radiación presente a nivel de tierra  $T$  de la siguiente forma

$$L^s(\lambda) = L^t(\lambda)\tau(\lambda) + L^*(\lambda) + L_n(\lambda) \quad (1)$$

donde  $\tau(\lambda)$  es la transmisividad espectral de la atmósfera calculada para cada punto del suelo según su geometría de observación;  $L^*(\lambda)$  corresponde a la dispersión atmosférica de la luz artificial (Aubé, 2008) y  $L_n$  es un término de ruido aditivo que tiene en consideración la sensibilidad del dispositivo a las diferentes longitudes de onda.

Para cada píxel de la superficie observada, el flujo fotópico  $F$  se establece como sigue

$$F = K \int_0^{\infty} L^t(\lambda)V(\lambda)d\lambda \quad (2)$$

donde la constante  $K$  vale 683,002 lm/W (CIE, 1926) y  $V(\lambda)$  es la función de luminosidad fotópica definida por la CIE. Este flujo suele medirse en [ $\text{lm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ ] o bien [ $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ]. Si se tiene en cuenta el muestreo espacial y espectral de cualquier sensor de imagen y la dependencia de la atenuación atmosférica de la geometría de observación, la ecuación (2) puede reescribirse en el dominio discreto como

$$F(x,y) = K \sum_{i=1}^{N_{BA}} \frac{L_i^s(x,y) - (L_i^*(x,y) + L_{n,i}(x,y))}{\tau_i(x,y,z,x_s,y_s,z_s,CWV)} V_i \Delta\lambda_i \quad (3)$$

donde  $x$  y  $y$  son las coordenadas UTM para un píxel de la imagen corregida geoméricamente correspondiente a un punto genérico  $P(x,y,z)$  del suelo observado por el sensor desde la posición  $S(x_s,y_s,z_s)$ ;  $\Delta\lambda_i$  es la anchura espectral del filtro asociado con la banda espectral  $i$ ;  $V_i$  es el valor de  $V(\lambda)$  integrado para el filtro de la banda  $i$ , y  $N_{BA}$  es el número de bandas adquiridas por el sensor hiperspectral. La expresión en (3) establece, para el término de transmisividad hiperspectral  $\tau_p$ , su dependencia respecto de la geometría de observación del píxel y también del contenido de vapor de agua de la atmósfera ( $CWV$ : *Colum Water Vapor*) en el momento de la captura.

Finalmente, si se asume en primera aproximación el efecto de dispersión por aerosoles y el término de ruido aditivo independientes de la geometría de observación, es posible agrupar todas las contribuciones de ruido en un único término aditivo  $L_n$ , y reescribir (3) como

$$F(x,y) = K \sum_{i=1}^{N_{BA}} \frac{L_i^s(x,y)}{\tau_i(x,y,z,x_s,y_s,z_s,CWV)} V_i \Delta\lambda - L_n \quad (4)$$

### 3. Zona de estudio y datos

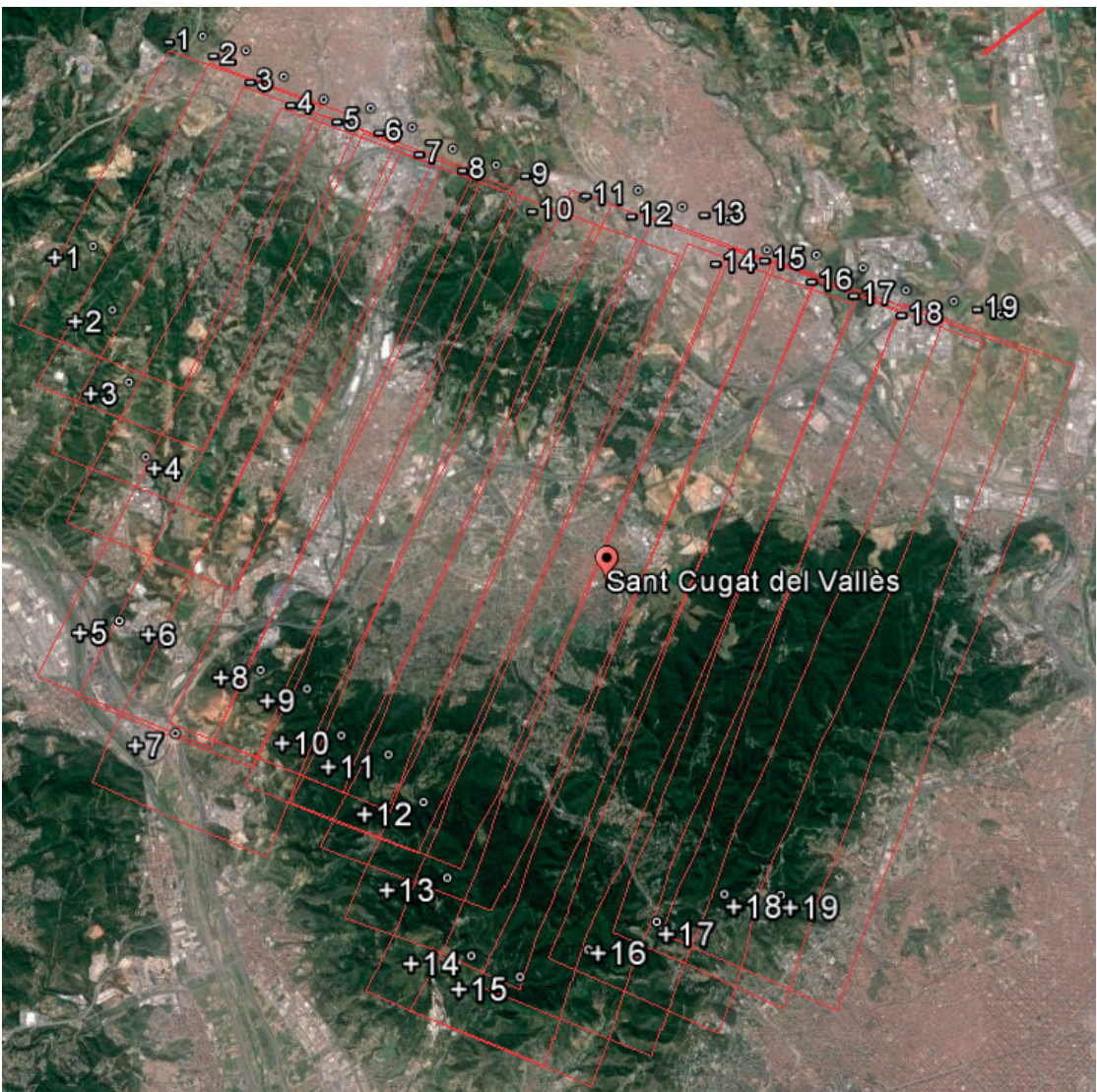
La zona de estudio utilizada para demostrar la utilidad de la metodología propuesta cubre los ayuntamientos de Sant Cugat del Vallès, Cerdanyola del Vallès y Rubí, al noroeste de la ciudad de Barcelona. Estos ayuntamientos han sido muy activos durante los últimos años promoviendo políticas de eficiencia energética para optimizar la gestión pública y, en última instancia, la calidad de vida de sus ciudadanos. Con el fin de poder proporcionar una clara descripción de sus intervenciones en el alumbrado público urbano en un breve lapso temporal, el ICGC ha realizado un vuelo nocturno sobre estos tres municipios con un



sensor hiperespectral AisaEAGLE-II en el marco de un proyecto piloto de eficiencia energética.

Para cubrir la zona de interés, de aproximadamente 150 km<sup>2</sup>, se planificaron 19 líneas de vuelo a una altura aproximada de 2200 m sobre el terreno. La Figura 2 muestra la trayectoria del avión en las diferentes pasadas y el correspondiente recubrimiento nominal del sensor hiperespectral. El vuelo se realizó durante la noche del 18 al 19 de noviembre de 2014, entre las 23:00 UTC y las 2:00 a.m. del día siguiente.

El sensor aeroportado AisaEAGLE-II, fabricado por la empresa finlandesa SPECIM, es un radiómetro de barrido (de escaneo por líneas) y mide la radiancia espectral de la escena observada en la región del espectro electromagnético VNIR. El sensor tiene un detector bidimensional de tecnología CCD (*Charge-Coupled Device*), que permite seleccionar bandas específicas dentro de su rango espectral. En el eje transversal a la línea de navegación, la resolución espacial depende de la altura de vuelo y de la focal de la óptica del sensor. El tamaño del píxel en la dirección de vuelo viene determinado por la velocidad del avión sobre el terreno y por la frecuencia de muestreo (*frame rate*).



**Figura 2.** Planificación de las 19 líneas de vuelo para el recubrimiento de la zona de interés.

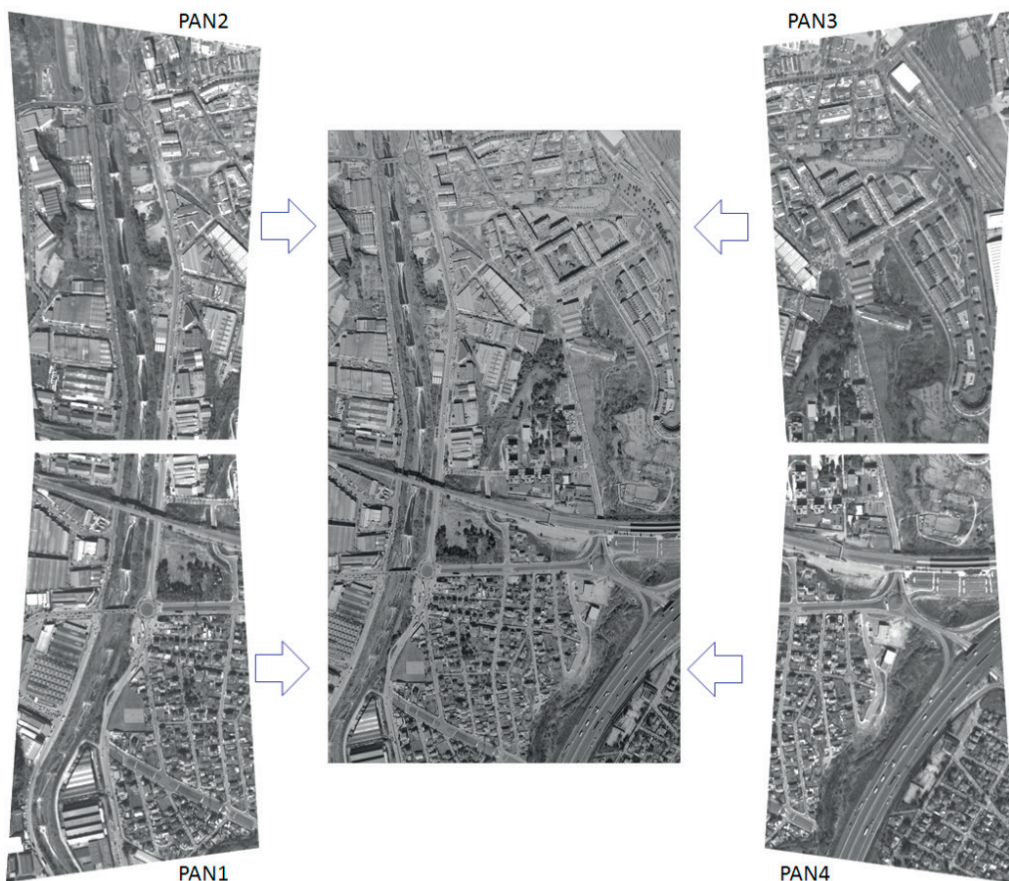
**Tabla 1 .** Características del sensor aeroportado AisaEA-GLE-II.

Rango espectral [nm]	406,3-993,8
Resolución espectral [nm]	4,6
Máximo número de bandas	254
Número de banda nocturnas	128
FOV[°]	37,7
Detectores espaciales en CCD	1024
Resolución (GSD)[m]	1,5

El sensor se calibra anualmente a nivel geométrico, espectral y radiométrico. La Tabla 1 resume sus características principales y también los parámetros de configuración utilizados para las adquisiciones nocturnas consideradas en este trabajo. Con respecto a la precisión radiométrica en la determinación del flujo luminoso, el error estimado en la recuperación del parámetro de luminancia está

alrededor del 5%. Este resultado se ha obtenido mediante medidas hiperspectrales realizadas en laboratorio de la esfera integradora del ICGC, fabricada por la empresa estadounidense Hoffman Engineering, teniendo en consideración el error de la calibración absoluta de la esfera realizada por el NPL (*National Physical Laboratory*) en Reino Unido.

Durante el vuelo, simultáneamente a las adquisiciones AisaEAGLE-II se tomaron imágenes fotogramétricas de alta resolución con una cámara Digital Mapping Camara (DMC), fabricada por la empresa alemana Zeiss Intergraph (*Zeitller et al., 2002; Dörstel, 2003*). Esta cámara adquiere simultáneamente cuatro canales multispectrales (Rojo o R, Verde o G, Azul o B, e infrarrojo o NIR) de baja resolución y un canal pancromático (PAN) de alta resolución. El factor de escala entre



**Figura 3.** Esquema del proceso de síntesis de la imagen pancromática DMC como mosaico de cuatro cabezales ópticos diferentes.



los canales de baja y alta resolución es 1:4. A su vez, el canal pancromático es el resultado de un mosaico obtenido a partir de cuatro subimágenes adquiridas por cuatro cabezales ópticos diferentes ligeramente convergentes. El esquema de la Figura 3 describe a nivel visual este proceso; la Tabla 2 resume las características principales de la cámara fotogramétrica y los parámetros de configuración utilizados para las adquisiciones nocturnas.

**Tabla 2.** Características de la cámara fotogramétrica DMC.

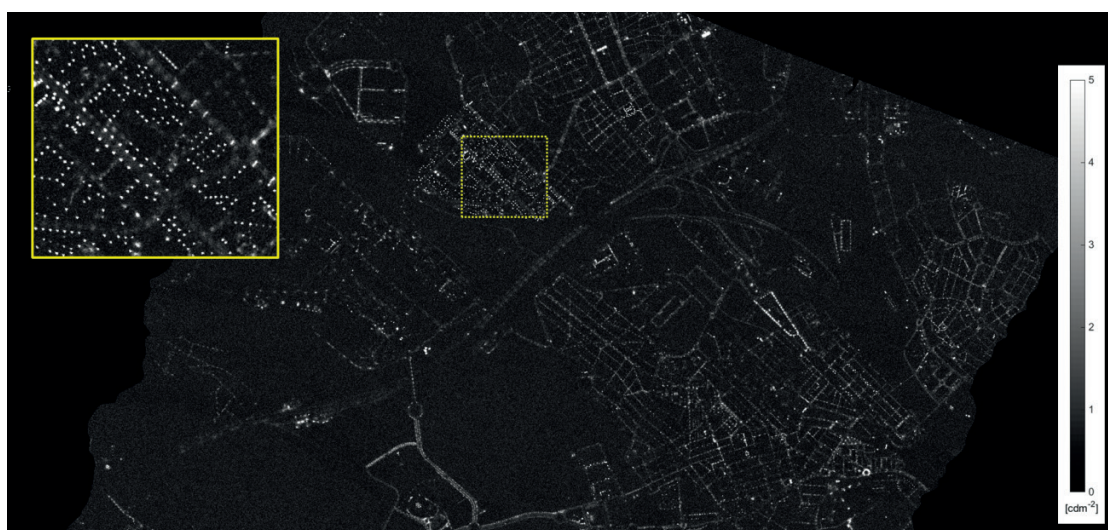
FOV [°]	69,3 (ACT)×42(ALT)
Detectores en CCD (HR)	13824×7680
Detectores en CCD (LR)	3072×1920
Número de bandas	1(panHR)/4LR
GSD [m]	0,25(panHR)/1(LR)

#### 4. Mapa de luminancia basado en AISA-EAGLE-II

Una vez realizado el proceso de corrección radiométrica de los datos hiperespectrales, que convierte los niveles digitales (DN) adimensionales proporcionados por el sensor en unidades de radiancia espectral [ $Wcm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ ], y de corrección geométrica, se ha procedido a la estimación del parámetro de transmisividad  $\tau$  a nivel de píxel en las diferentes bandas.

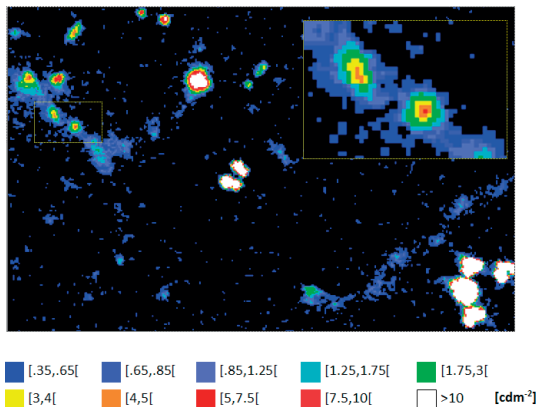
A falta de un radiosondeo simultáneo al proceso de adquisición, se ha obtenido una estimación del vapor de agua atmosférico real a partir de los perfiles atmosféricos distribuidos por NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) a nivel mundial (Barsi, 2005). La información NCEP ha sido generada teniendo en consideración no solamente las coordenadas geográficas del punto central de cada línea de vuelo y la hora de la captura, sino también las medidas simultáneas de temperatura, presión y humedad a nivel de suelo proporcionadas por la estación meteorológica de Cerdanyola del Vallés del Servicio Meteorológico de Cataluña (SMC), situada a 7 km del centro de la zona de estudio.

Finalmente, se ha utilizado MODTRAN5.0 para generar una LUT (*Look Up Table*) de valores de  $\tau$  con paso de ángulo cenital de  $5^\circ$  y de altura de 200 m. El valor de  $\tau$  a nivel de píxel en cada banda se ha obtenido a través de una interpolación lineal de la LUT. En la Figura 4 puede observarse una muestra del mapa de luminancia  $F$  sobre una parte de la zona de estudio (Sant Cugat del Vallès), obtenido aplicando (4) a los datos hiperespectrales de las pasadas 3-4-5 de la Figura 2, y realizando un mosaico de los resultados. Para estimar y sucesivamente eliminar la componente  $L_n$  generada por la contribución de luz dispersa y de ruido aditivo, se ha utilizado una zona de la escena sin



**Figura 4.** Fragmento del mapa de luminancia AISA-EagleII correspondiente a las líneas de vuelo de 3-4-5 a 1,5 m de resolución.

ninguna fuente de luz. Es posible obtener una mejor discriminación del flujo luminoso a nivel visual utilizando una segmentación no lineal entre 0,35 y 10 cd·m<sup>-2</sup> basada en los niveles de iluminación del alumbrado público definidos en el Real Decreto 1890 de 2008 (Real Decreto 1890/2008). Se muestra un ejemplo del resultado obtenido en la Figura 5.



**Figura 5.** Ejemplo de segmentación del mapa de la luminancia obtenido con información hiperspectral AisaEAGLE-II a 1,5 m de resolución.

## 5. Mapa de luminancia basado en DMC calibrada por regresión lineal con AISAEAGLE-II

Con el objetivo de mejorar la resolución espacial y el rango dinámico del mapa de luminancia de la zona de interés, se ha aplicado una estrategia basada en la calibración cruzada (fusión) de diferentes sensores.

El tiempo máximo de exposición de la cámara, limitado a 33 ms, proporciona fotogramas caracterizados por valores digitales mucho más bajos que los típicos en imágenes diurnas, con fallos frecuentes (alrededor de un 90%) en la cadena de procesamiento estándar del fabricante, y evidentes patrones de ruido electrónico de lectura (*Read Noise Patterns*). Ha sido por lo tanto necesario desarrollar una cadena de procesamiento *ad-hoc* para las capturas nocturnas de la DMC, que llevara a cabo la generación de las imágenes virtuales pancromáticas como unión de los cuatro cabezales. Para la eliminación de las componentes espectrales de ruido espacial relacionadas con el proceso

electrónico de lectura de los CCD pancromáticos se ha implementado un bloque adicional de filtrado elimina-banda (*notch*). La técnica de filtrado se basa en la detección de los picos aislados del espectro bidimensional de la imagen de entrada, y su sucesiva eliminación a través de filtros gaussianos que reducen su contribución al espectro de potencia total de la imagen (Oppenheim y Schaffer, 1999). La Figura 6 ofrece un ejemplo del patrón de ruido electrónico de una imagen pancromática y del resultado obtenido después de la aplicación del filtrado elimina-banda. Cabe destacar que las componentes de frecuencia del ruido electrónico son mucho más altas que las componentes propias de la escena observada, y que su eliminación no determina ninguna pérdida de detalles espaciales en la imagen final. Sin embargo, de no filtrarlas estas contribuciones afectarían visualmente a la calidad del mapa final del flujo luminoso.



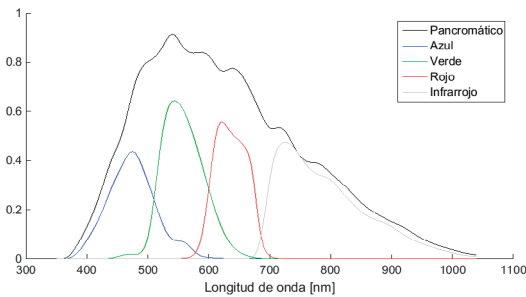
**Figura 6.** Ejemplo de patrón de ruido electrónico en el canal pancromático para una captura nocturna DMC y de su eliminación con técnicas de filtrado elimina-banda.

Los pasos siguientes al filtrado espectral han consistido en la calibración radiométrica de las imágenes DMC y la compensación de la atenuación atmosférica a nivel de píxel estimada vía MODTRAN5.0. La radiancia DMC a nivel de suelo se puede expresar como

$$B_i(x,y) = \frac{f(DN_i(x,y), D, t_s)}{\tau_i(x,y,z, x_s, y_s, z_s, CWV)} \quad (i=R, G, B, NIR, PAN) \quad (5)$$

donde  $i$  especifica la banda DMC;  $DN_i(x,y)$  y  $B_i(x,y)$  representan el valor no calibrado y la radiancia a nivel de suelo del píxel con coordenadas  $(x,y)$ ;  $f$  es la función de calibración radiométrica de la cámara proporcionada por el fabricante, que depende también de la exposición  $t_s$  y de la apertura del diafragma  $D$  del fotograma. Cabe destacar

que para llevar a cabo la estimación de los valores de  $\tau_i$  se ha utilizado la descripción espectral de los filtros DMC proporcionada por el fabricante y mostrada en la Figura 7.



**Figura 7.** Descripción espectral de los bandas multispectrales y pancromática de la cámara fotogramétrica DMC proporcionada por Zeiss Intergraph.

Una vez obtenida la calibración absoluta del canal pancromático y de los canales multispectrales, se ha generado un primer mosaico de ambos conjuntos de imágenes por separado. El criterio seguido ha sido la minimización del ángulo cenital de observación para cada píxel de la zona de interés. El diagrama de Voronoi construido a partir de las coordenadas UTM de la cámara en la adquisición de cada fotograma ha proporcionado directamente las líneas de costura entre fotogramas adyacentes. Esta condición de unión de los fotogramas describe, para cada píxel, el flujo luminoso recibido con ángulo más cercano al nadir dentro del conjunto de adquisiciones disponibles.

A continuación se ha identificado la combinación lineal de las bandas  $B_i$  de la cámara DMC

que mejor reproduce el mapa de luminancia  $F$  obtenido con la información hiperespectral. La recuperación de la información de luminancia con DMC se puede expresar como:

$$F(x,y) = \sum_{i=1}^{N_{DMC}} c_i B_i(x,y) \tag{6}$$

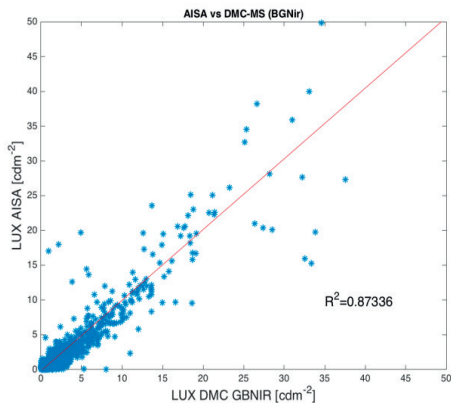
donde  $N_{DMC}$  corresponde al número de bandas DMC de la combinación lineal considerada, y  $c_i$  son los coeficientes obtenidos con un ajuste de mínimos cuadrados entre los puntos seleccionados en el mapa de luminancia de referencia y en la nueva estimación.

Para reducir los efectos radiométricos debidos a la diferente geometría de observación entre el sensor de línea (AISA) y el de *frame* (DMC), se ha realizado un filtrado de paso bajo del mosaico de luminancia AISA (1,5 m<sup>2</sup>) y los mosaicos multispectrales (1,0 m<sup>2</sup>) y pancromático (0,25 m<sup>2</sup>) DMC hasta una resolución espacial común de 60×60 m<sup>2</sup>. Además, para el ajuste se han considerado sólo aquellos píxeles cuyo ángulo de observación cenital fuera menor de 5° en las dos geometrías. Estas dos acciones permiten reconducir la información procedente de los dos sensores a unos parámetros de observación similares y por lo tanto proceder a un análisis comparativo entre los valores de sus medidas. La colección de imágenes de la Figura 8 y la Tabla 3 describen la calidad de correlación entre el mapa de luminancia AISA y el mapa obtenido con diferentes combinaciones de las bandas fotogramétricas. También se ha analizado la información adicional contenida en la banda pancromática respecto a los canales multispectrales. Para ello, se ha realizado el ajuste de la información de alta resolución respecto al mapa

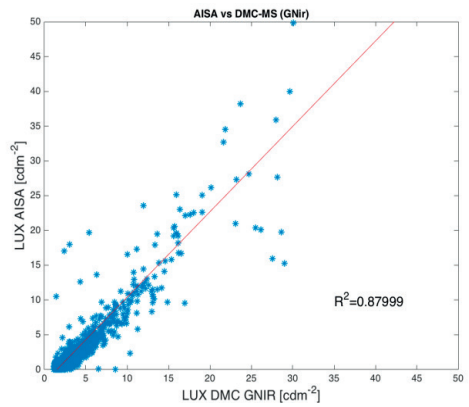
**Tabla 3.** Coeficiente R<sup>2</sup> de la regresión lineal múltiple aplicada a diferentes combinaciones de bandas DMC para mapas de luminancia de referencia AISA y DMC multispectral.

		Bandas del sensor secundario					R <sup>2</sup> Regresión Lineal Múltiple
		Azul	Verde	Rojo	Infrarrojo	Pancromático	
Mapa Luminancia de Referencia	AISA	X	X		X		0,874
			X		X		<b>0,880</b>
			X			X	<b>0,883</b>
	DMC MS				X		0,720
					X		<b>0,856</b>

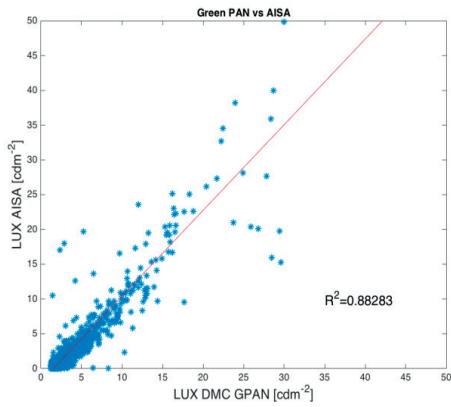




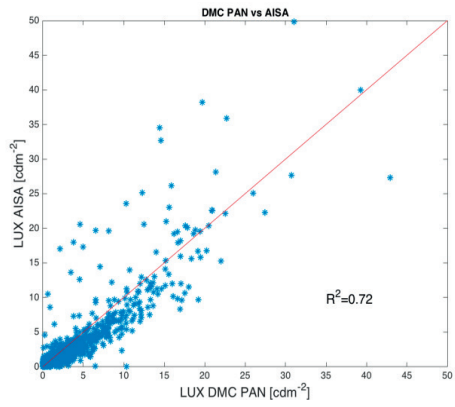
(a) AISA y DMC (Verde-Azul-NIR)



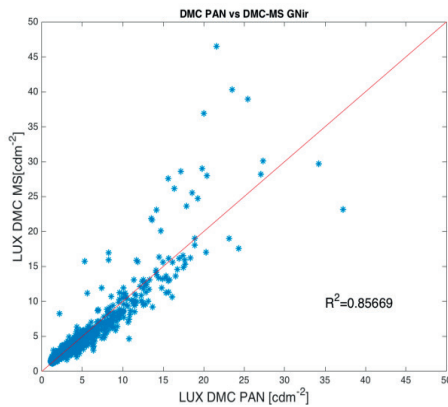
(b) AISA y DMC (Verde-NIR)



(c) AISA y DMC (Verde-PAN)



(d) AISA y DMC (PAN)



(e) DMC (Verde-NIR) y DMC (PAN)

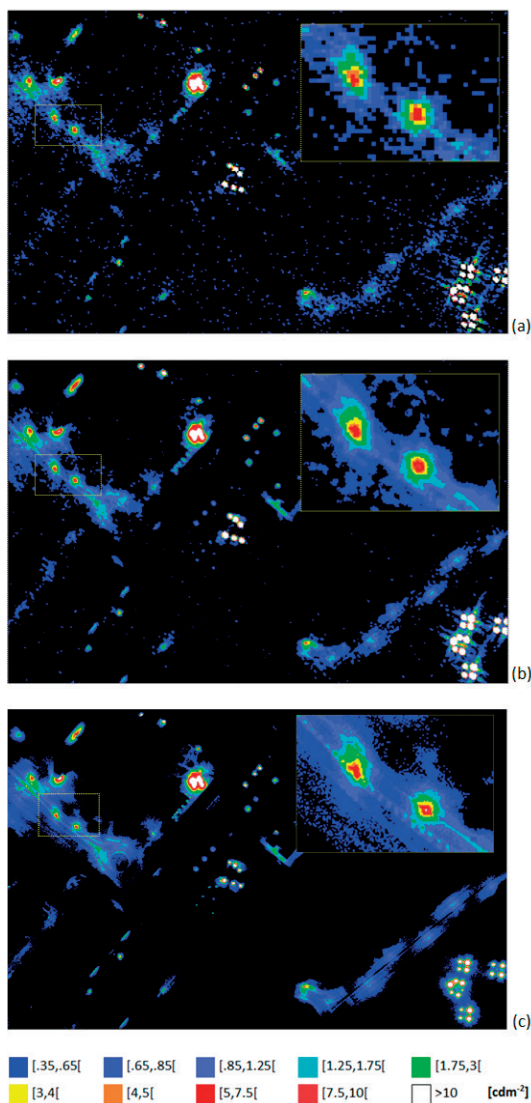
**Figura 8.** Regresión lineal múltiple entre mapa de luminancia primario (referencia) y mapa de luminancia secundario (estimación) para diferentes combinaciones de bandas DMC.

de luminancia DMC de baja resolución que mejor reproduce la estimación AISA.

En cuanto a la estimación basada sólo en la información multiespectral, el mejor resultado se obtiene combinando las bandas azul y verde de la DMC ( $R^2 = 0,879$ ). El mejor mapa de luminancia de alta resolución espacial se obtiene combinando la imagen pancromática con el canal verde interpolado a la resolución espacial pancromática ( $R^2 = 0,882$ ). En general, las buenas correlaciones entre medidas de la luminancia del sensor AISA y de la cámara DMC demuestran la posibilidad de calibrar radiométricamente un sensor fotogramétrico pensado para aplicaciones cartográficas y convertirlos en un sensor de teledetección de resolución espacial y sensibilidad radiométrica mejores que cualquier sensor hiperespectral.

Las imágenes de la Figura 9 ofrecen un ejemplo de la información de luminancia obtenida a 1 m y 25 cm con la DMC sobre la misma zona analizada en la Figura 5. En la imagen (a) se puede apreciar la substancial mejora en la calidad de las imágenes en términos de resolución espacial y de rango dinámico respecto al mapa obtenido a 1,5 m con el AisaEAGLE-II: algunas lámparas agrupadas en el mapa hiperespectral son claramente distinguibles en el mapa multiespectral. Esto se debe a la mayor anchura de los filtros multiespectrales de la DMC, mostrados en la Figura 7, respecto a las bandas hiperespectrales (Tabla 1), que proporciona una mayor sensibilidad en caso de niveles bajos de energía en el espectro fotópico. De la misma manera, una ulterior mejora se obtiene añadiendo a la información multiespectral el canal pancromático en la determinación del mapa de luminancias. En la imagen (b) podemos observar una mejor reconstrucción de la zona iluminada alrededor de los focos puntuales de iluminación nocturna. Sin embargo, la combinación lineal de la banda pancromática con el canal verde interpolado conlleva la pérdida de los detalles espaciales presentes en la imagen adquirida a 25 cm.

Con el objetivo de explotar la máxima resolución espacial de la DMC, se ha estimado también la calidad del mapa de luminancia basado sólo en el uso de la banda pancromática. Como mapa de referencia, se ha considerado ambos productos AISA y DMC multiespectral. El resultado final es un mapa espacialmente más detallado del flujo



**Figura 9.** Ejemplo de segmentación del mapa de luminancia obtenido vía calibración cruzada de información hiperespectral AISA y DMC multiespectral verde y NIR (a), multiespectral verde y pancromática (b), y sólo pancromática (c).

luminoso, pero con una correlación más baja con la información hiperespectral (Figura 8d) respecto al caso multiespectral (Figura 8c).

Finalmente, cabe destacar que el análisis visual de los mapas obtenidos no revela en ningún caso la presencia de un sesgo significativo en la recuperación del flujo luminoso con datos fotogramétricos, confirmando por un lado la validez de la metodología multi-sensor de recuperación

del parámetro de luminancia, y por otro el uso de datos fotogramétricos calibrados para aplicaciones de teledetección.

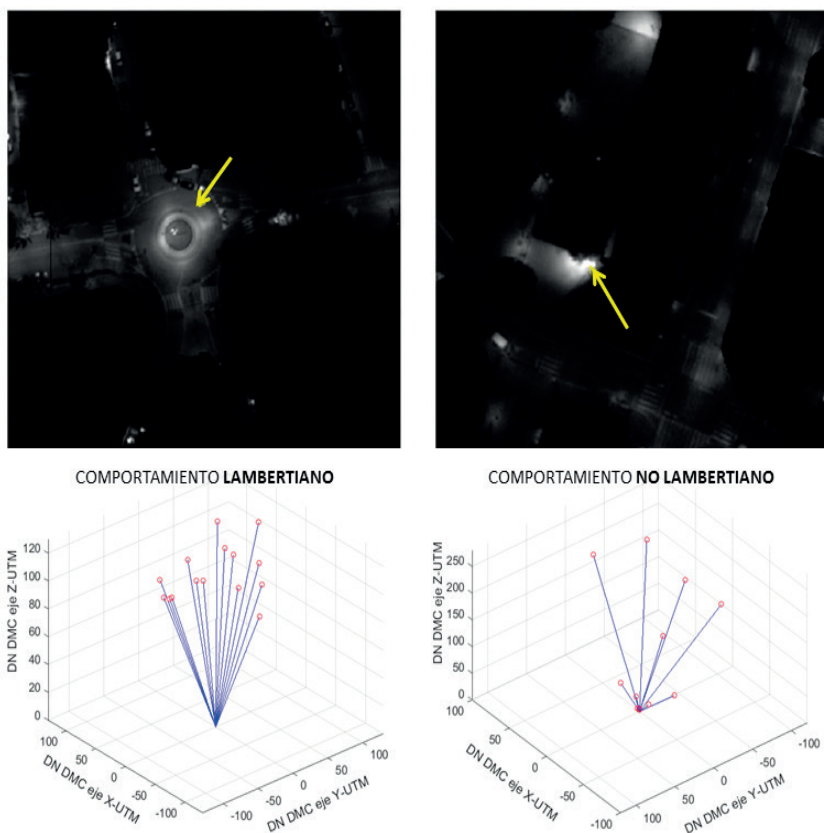
## 6. Efectos de bidireccionalidad en el flujo luminoso

La luminancia de una superficie describe la intensidad luminosa emitida por unidad de área en una dirección dada. Desde el punto de vista teórico, bajo la hipótesis de difusión lambertiana de una superficie, se puede calcular su emitancia luminosa  $E$  [ $\text{lmm}^{-2}$ ] como

$$E = \pi F. \quad (7)$$

Para poder comprobar si esta condición se cumple en un entorno urbano es necesario sin embargo un indicador del nivel de bidireccionalidad de la respuesta de cada píxel en el suelo. Con este objetivo, una vez desarrollada la metodología básica

de recuperación de mapas de luminancia con sensores fotogramétricos, se ha procedido a analizar la información multi-angular de cada punto en tierra. La visión de un mismo punto en los diferentes fotogramas proporciona una descripción directa de la variabilidad angular del flujo luminoso procedente de ese punto. Como ejemplo, en las imágenes de la Figura 10 se puede observar la respuesta de dos puntos seleccionados en la zona urbana en el canal pancromático, uno con comportamiento fuertemente isotrópico y otro fuertemente anisotrópico. Los segmentos de color azul describen la respuesta del punto en tierra en todos los fotogramas de la colección en los que ha sido observado: su dirección define la geometría de observación (ángulos cenital y acimutal) en cada fotograma y su longitud la intensidad medida en niveles digitales de la DMC. Como primera aproximación, un descriptor de la uniformidad espacial del flujo luminoso podría ser directamente la dispersión de la medida DMC



**Figura 10.** Ejemplos de bidireccionalidad de la respuesta de dos puntos en tierra con comportamiento fuertemente isotrópico o lambertiano (izquierda), y fuertemente anisotrópico o no lambertiano (derecha).



en los diferentes fotogramas, aunque su número depende de la posición del punto considerado respecto a las trayectorias de vuelo, del campo de visión del sensor y del solapamiento entre pasadas. Los resultados en este ámbito son aun preliminares y serán necesarias nuevas pruebas para validar su fiabilidad. En cualquier caso, planteamos como futura línea de investigación la generación de un mapa de emitancia luminosa de alta resolución basado en un parámetro de calidad que compruebe la hipótesis de comportamiento lambertiano de cada punto de la superficie observada. Esta información podría resultar muy valiosa para emprender acciones de optimización en la gestión del alumbrado público y de detección de fenómenos de intrusión lumínica.

## 7. Conclusiones

En este artículo se ha presentado una metodología desarrollada por el ICGC para cuantificar el flujo luminoso de la iluminación urbana nocturna mediante el uso de un sensor hiperespectral y una cámara fotogramétrica digital. Se han mostrado resultados del proceso realizado para obtener mapas de luminancia con imágenes nocturnas adquiridas sobre el municipio de Sant Cugat del Vallès.

Con el propósito de superar las limitaciones en cuanto a resolución espacial y radiométrica del sensor hiperespectral, se han procesado las imágenes fotogramétricas adquiridas simultáneamente siguiendo una estrategia metodológica de fusión de sensores. Como resultado se obtienen mapas de luminancia de alta resolución y sensibilidad mejorada con una metodología plenamente operativa. Además, una vez establecida la relación de calibración absoluta de la cámara fotogramétrica respecto al sensor hiperespectral, la generación de mapas de luminancia pueden obtenerse procesando sólo las imágenes de alta resolución. Este producto representa por lo tanto una herramienta valiosa a disposición de las administraciones públicas para realizar un seguimiento de cualquier acción adoptada tanto desde el punto de vista de la gestión de la iluminación urbana como de su efectividad en términos de eficiencia energética. Finalmente, se ha introducido un primer análisis de los efectos de bidireccionalidad del flujo luminoso para la estimación de la emitancia luminosa, que constituye un parámetro novedoso y al mismo tiempo prometedor de cara a la descripción de los efectos de la iluminación artificial a nivel medioambiental. Finalmente,

será imprescindible la realización de una campaña de validación de la metodología propuesta en este artículo a través de medidas de campo, utilizando por ejemplo un luminancímetro. El punto más crítico será la capacidad de reproducir la geometría de observación de los sensores aeroportados para poder garantizar la validez de los resultados.

## Referencias

- Aubé, M. 2008. *Light Pollution Modelling and Detection in a Heterogeneous Environment*. Proceedings of Starlight, a Common Heritage, La Palma, España.
- Barducci, A., Benvenuti, M., Bonora, L., Castagnoli, F., Guzzi, D., Marconi P., Pippi, I. 2006. Hyperspectral remote sensing for light pollution monitoring, *Annals of Geophysics*, 49(1), 305-310.
- Barsi, J.B., Barker J.L., Schott J.R. 2003. An Atmospheric Correction Parameter Calculator for a Single Thermal Band Earth-Sensing Instrument, *IEEE International Proceedings on Geoscience and remote Sensing Symposium*, Toulouse, Francia, 21-25 Julio, pp. 3014-3016. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2003.1294665>
- Berk, A., Anderson, G.P., Acharya, P.K., Bernstein, L.S., Muratov, L., Lee, J., Fox, M., Adler-Golden, S.M., Chetwynd, J.H., Hoke, M.L., Lockwood, R.B., Gardner, J.A., Cooley, T.W., Borel, C.C., Lewis, P.E. 2005. MODTRAN 5: A Reformulated Atmospheric Band Model with Auxiliary Species and practical Multiple Scattering options: update. *Proceedings of the SPIE*, 5806, 662-667. <https://doi.org/10.1117/12.606026>
- CIE. 1926. *Commission internationale de l'Eclairage Proceedings*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Dörstel, C. 2003. DMC- Practical Experiences and Photogrammetric System Performance in Fritsch, D. (Ed), *Proceedings of the 49<sup>th</sup> Photogrammetric Week*, Stuttgart, Alemania, 1-5 Septiembre, pp. 59-66.
- Real Decreto 1890/2008, de 14 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus Instrucciones técnicas complementarias EA-01 a EA-07, *Boletín Oficial del Estado*, 19 de noviembre de 2008, 279, pp. 45988-46058.
- Gaston, K.J., Visser, M.E., Hölker, F. 2015. The biological impacts of artificial light at night: The research challenge, *Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences*. 370:20140133. <https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0133>

- Kyba, C.C.M., Graz, S., Kuechly H., Sánchez de Miguel, A., Zamorano, J., Fischer, J., Hölker F. 2015. High-Resolution Imagery of Earth at Night: New Sources, Opportunities and Challenges, *Remote Sensing*, 7(1), 1-23. <https://doi.org/10.3390/rs7010001>
- Naom, L., Kasper, J., Jorg, H.M., Stuart, P. 2014. A new source for high spatial resolution night time images – The EROS-B commercial satellite, *Remote Sensing of Environment*, 149, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.019>
- Oppenheim, A.V., Schafer, R.W. 1999. *Discrete-Time Signal Processing*, Second Edition, Prentice-Hall Inc.
- Tardà, A., Palà, V., Arbiol, R., Pérez, F., Viñas, O., Pipia, L., Martínez, L. 2011. Detección de la iluminación exterior urbana nocturna con el sensor aerotransportado CASI-550, *Proceedings of International Geomatic Week*, 15-17 Marzo, Barcelona, España.
- Zeitler, W., Dörstel, C., Jacobsen, K. 2002. Geometric Calibration of the DMC: Method and Results, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, 2002, 34, 324-332.