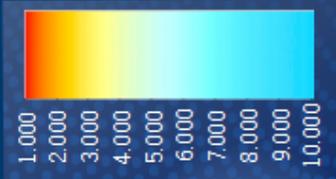


La **temperatura de color** correlacionada (CCT), utilizada hasta ahora, indica la percepción del color de la luz por el ojo humano, no mide la cantidad real de luz azul emitida.



Temperatura de color en kelvins

# ÍNDICE ESPECTRAL G

El **Índice espectral G** mide la cantidad de radiación azul que emite una fuente de luz en el rango visible. Este color, durante la noche, es el más perjudicial para la biodiversidad y para las observaciones astronómicas.

La Consejería, con objeto de proteger las zonas con mayor calidad de cielo, va a limitar la cantidad de luz azul a través del Índice espectral G

Zona luminica	Índice espectral G	Comparación entre índice espectral G / CCT (K) para distintos tipos de fuentes de luz	
		Cumplen	No cumplen
E1, E2 y E3 insertas en E1	G ≥ 2,0	PC ámbar: 4,9 / 1727 Vapor de sodio baja presión: 3,8 / 1834 Vapor de sodio alta presión: 2,2 / 2010 Incandescente: 2,1 / 2554 Fluorescente: 2,05 / 3000 LED: 2,1 / 2244 LED: 2,02 / 2500	LED: 1,9 / 2340 LED: 1,6 / 2680 Incandescente: 1,5 / 2574
		E3	G ≥ 1,5
E4	G ≥ 1,0	LED: 1,06 / 4000	Halogenuros metálicos: 0,4 / 4700 LED: 0,8 / 4000



JUNTA DE ANDALUCÍA  
CONSEJERÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA Y PESCA Y DIRECCIÓN GENERAL DE CALIDAD AMBIENTAL Y CAMBIO CLIMÁTICO

Abril, 2019



## ÍNDICE

1. CONTEXTO.....	3
2. OBJETO.....	5
3. DESCRIPCIÓN DEL ÍNDICE ESPECTRAL G.....	6
4. CÁLCULO DEL ÍNDICE ESPECTRAL G.....	10
5. EL ÍNDICE ESPECTRAL G EN EL PROYECTO DE REGLAMENTO ANDALUZ.....	13
ANEXO I: FILTROS PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE ESPECTRAL G.....	14
ANEXO II: FÓRMULAS COMPLEMENTARIAS RELACIONADAS CON EL ÍNDICE ESPECTRAL G.....	15
ANEXO III: DOS CASOS PRÁCTICOS.....	18



## 1. CONTEXTO

El cielo de calidad andaluz es un patrimonio natural, seña de identidad, que confiere un valor añadido a la rica diversidad biológica y geológica de nuestra región. De hecho, **el 82% del territorio cuenta con cielos nocturnos de calidad suficiente para observar la Vía Láctea**; lo que implica que el 17% de la población puede gozar de este privilegio sin salir de su municipio. De este modo, **nuestro cielo constituye un recurso científico, económico, cultural y paisajístico, generador de empleo verde asociado a su preservación** que se materializa en los sectores del astroturismo, la consultoría especializada y la I+i, los dos últimos con una demanda de perfil de alta cualificación.

Como muestra de ello, **en la Comunidad se encuentran los observatorios astronómicos de Calar Alto y Sierra Nevada, de carácter internacional**, que contribuyen a elevar el nivel científico andaluz mediante descubrimientos tan relevantes como el anillo del planeta enano Haumea o la participación en proyectos pioneros como CARMENES, en el seno del cual se ha desarrollado un instrumento único en el mundo que ya ha dado sus primeros frutos con el descubrimiento de nuevos exoplanetas. Además, existen en Andalucía otros observatorios que contribuyen a la generación de datos relevantes y a la difusión y formación en esta materia.

Sin embargo, **este patrimonio natural se encuentra amenazado por la contaminación lumínica debida al diseño del alumbrado sin criterios de sostenibilidad y a una cultura de la luz mal entendida**, que asocia desarrollo con derroche energético.

No obstante, es notoria la evolución experimentada en el sector de la iluminación exterior desde sus orígenes en los que se aplicaban parámetros meramente luminotécnicos y económicos, para posteriormente incorporar el concepto de eficiencia energética, y finalmente, en los últimos años, empezar a integrar criterios ambientales.

Teniendo en cuenta que los efectos adversos de la luz alcanzan más de 100 km de distancia desde el lugar en que se genera, la contaminación originada en un área puede repercutir muy negativamente sobre otra, aunque se encuentre alejada de ella. De ahí, la responsabilidad de los profesionales públicos,



quienes debemos garantizar en el ámbito de nuestras competencias, el diseño y la gestión del alumbrado público con criterios de sostenibilidad. De este modo, se garantiza, además de la preservación del cielo, los ecosistemas y la salud, la reducción del gasto energético municipal y de la emisión de contaminantes a la atmósfera.

Con este fin, **la Junta de Andalucía inició, hace más de una década, su apuesta por la preservación de la oscuridad natural de la noche**, incorporando esta materia a la regulación autonómica mediante la Ley 7/2007 de 9 de julio de Gestión Integrada de la Calidad Ambiental y su posterior desarrollo reglamentario, en el año 2010.

Desde entonces, han sido muchos los trabajos llevados a cabo, sustentados en una estrecha colaboración interadministrativa que ha permitido la optimización de recursos públicos y en el establecimiento de una nutrida red de colaboradores nacionales e internacionales.

Actualmente, **la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible está inmersa en la tramitación de un nuevo reglamento para la preservación de la oscuridad natural de la noche frente a la contaminación lumínica**. En el mismo cobra especial relevancia el establecimiento de medidas para el diseño sostenible del alumbrado exterior, mediante la aplicación de los siguientes preceptos ambientales: **iluminar solo donde y cuando sea necesario, con la dirección, los niveles y el color de luz adecuados al uso de la zona**.

Entre estos preceptos, uno de los que recientemente ha cobrado mayor protagonismo es el color de la luz, debido a la proliferación en los últimos años de **luz blanca con elevado componente azul, siendo esta la que mayor impacto causa sobre la biodiversidad y las observaciones astronómicas**. Asimismo, conforme a la práctica totalidad de los estudios publicados, la luz con elevada proporción de este color es la que mayor efecto tiene sobre la salud.

Por tal motivo, la Consejería constituyó en 2011 un grupo internacional de expertos para alcanzar una posición común en materia de iluminación y, particularmente, fomentar el uso de la luz cálida frente a la luz blanca fría, concluyendo en 2014 con la Declaración internacional sobre el uso de la luz blanca, que se



tradujo al alemán, inglés italiano y español y que recomendaba el uso de fuentes de luz con reducidas emisiones en la banda azul.

A raíz de esta Declaración, el Comité Español de Iluminación creó un grupo de trabajo para analizar los posibles riesgos de la iluminación con tecnología LED, al que invitó a esta Consejería y que concluyó en 2018 con la necesidad de reducir la luz blanca azulada en horario nocturno.

Con objeto de poder cuantificar este parámetro, se ha desarrollado el índice espectral G, indicador fruto de I+i 100% andaluza, impulsado por esta Consejería, que caracteriza las propiedades espectrales de las fuentes de luz, posibilitando su clasificación de modo cuantitativo y preciso en función de la cantidad real de luz azul emitida respecto a la luz visible. La inclusión de este parámetro en las especificaciones técnicas de las lámparas aportará un nuevo criterio de sostenibilidad sobre el producto que se adquiere.

La Consejería incorporará el índice espectral G al nuevo reglamento para la preservación de la oscuridad natural de la noche frente a la contaminación lumínica, al objeto de garantizar el uso de fuentes de luz con el mínimo contenido posible en el azul en horas nocturnas y en todo el territorio andaluz. Dependiendo de la zona lumínica en la que la instalación se encuentre se debe cumplir con unos valores determinados de índice espectral G. Además para facilitar su cálculo ha desarrollado una herramienta con software de libre acceso que tiene disponible en su web.

Durante 2018 la Consejería estuvo compartiendo criterios sobre sostenibilidad en el alumbrado con el Join Research Center de la Comisión Europea, y esta colaboración se ha plasmado en la recomendación del uso del índice espectral G para cuantificar y limitar la cantidad de luz azul en su publicación Green Public Procurement of Road Lighting.

## 2. OBJETO

El objeto del presente documento es aportar toda la información necesaria sobre el índice espectral G para que cualquier persona interesada pueda proceder a su cálculo. El apartado 3 proporciona una descripción de carácter divulgativo, mientras que el apartado 4 muestra las bases técnicas de su cálculo. A continuación, el apartado 5 describe las restricciones a las fuentes de luz, asociadas a este índice, recogidas en el proyecto de reglamento para la preservación de la oscuridad natural de la noche frente a la contaminación lumínica. Por último, en los apéndices se exploran con más profundidad ciertos aspectos matemáticos y se ofrecen ejemplos de aplicaciones del índice espectral G en situaciones de diseño.



### 3. DESCRIPCIÓN DEL ÍNDICE ESPECTRAL G

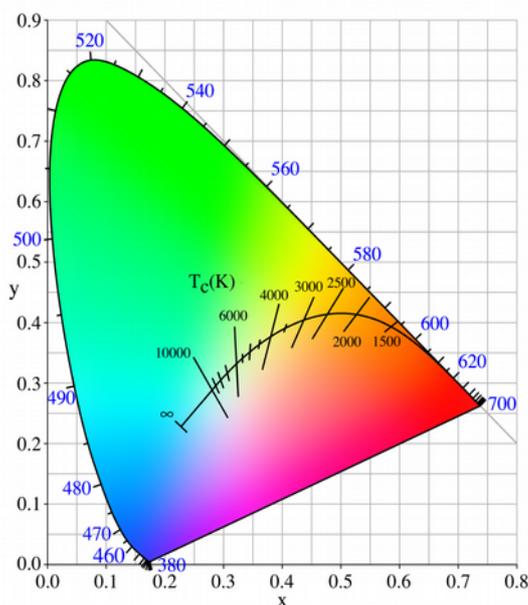
Durante mucho tiempo, el color de la luz artificial utilizada en iluminación se consideró un aspecto secundario del diseño de instalaciones de alumbrado, de interés más cercano a lo decorativo o estético. La situación ha cambiado en décadas recientes.

#### 3.1. CÓMO MEDIR EL COLOR DE UNA FUENTE DE LUZ

##### El índice de reproducción cromática (IRC)

Este parámetro evalúa las prestaciones de las fuentes de luz para facilitar que el ojo humano diferencie los colores de los objetos iluminados. Resulta relevante en situaciones de diseño en las que la reproducción correcta del color forme parte central del uso, como en eventos que deben transmitirse por televisión.

**Fig. 1.** Una de las versiones más frecuentes del diagrama colorimétrico del CIE. Las coordenadas  $x, y$  determinan el tono percibido por el ojo humano. El borde de la figura con forma de huella dactilar corresponde a los tonos espectrales puros, etiquetados con su longitud de onda en nanómetros. La curva central corresponde al "locus" de los cuerpos negros y se indican las temperaturas de color correspondientes. Fuente: Wikimedia Commons.



##### El diagrama colorimétrico

La Comisión Internacional del Alumbrado emplea un *diagrama colorimétrico* en el que, mediante dos coordenadas ( $x$  e  $y$ ), se puede especificar cualquiera de los tonos de color que es capaz de distinguir la visión humana (figura 1).



## La temperatura de color y la temperatura de color correlacionada

Este parámetro procede de los tiempos en los que los sistemas de alumbrado se basaban en lámparas incandescentes. Cualquier cuerpo incandescente emite luz por el simple hecho de estar caliente. Cuando la temperatura del objeto es baja, la mayor parte de la radiación emitida se encuentra en la parte infrarroja del espectro, por eso los sistemas de calefacción basados en resistencias se llaman «de infrarrojos». Si calentamos un metal se pone al rojo vivo y si aumentamos aun más la temperatura puede llegar a alcanzar tonos blancos antes de fundirse. Los filamentos de las lámparas incandescentes y halógenas se diseñan de manera que puedan alcanzar temperaturas muy elevadas sin dañarse, y esto permite que la luz de algunas lámparas halógenas se torne muy blanca, incluso azulada.

Todos los objetos que emiten luz por el simple hecho de estar calientes reciben en física la denominación de «cuerpos negros» y sus coordenadas colorimétricas caen sobre una misma línea del diagrama de la figura 1. Por tanto, la *temperatura de color* de una lámpara incandescente queda fijada por la temperatura a la que se encuentra su filamento dentro del diagrama colorimétrico y se mide en la escala kelvin que equivale a sumar 273 unidades a la medida habitual en grados centígrados. El Sol es una fuente incandescente cuya temperatura de color es de unos 5800 kelvin.

Pero hoy día ya no iluminamos con lámparas incandescentes, las fuentes de luz se basan en principios físicos totalmente distintos a los cuerpos negros. Aun así, la industria del alumbrado se ha mantenido fiel a la tradición de describir la tonalidad aproximada de la luz emitida por las lámparas mediante la temperatura a la que tendría que estar un cuerpo negro para emitir luz con el color más parecido posible al de la fuente descrita. Nace así el concepto de *temperatura de color correlacionada (CCT)*: ante una lámpara, en lugar de especificar sus coordenadas colorimétricas  $x,y$  (lo cual daría una valoración exacta de su color percibido), se procede a buscar qué cuerpo negro (lámpara incandescente) tiene un color más cercano, y se da la temperatura de ese cuerpo negro, medida en kelvins.

Por supuesto, esta manera de proceder hace que, de manera general, las lámparas etiquetadas con CCT más elevada ofrezcan una luz más blanquecina, con más componente azul, menos rojiza, porque así sucede con los cuerpos negros, es decir, con las lámparas incandescentes y halógenas. Sin embargo, se producen desviaciones muy considerables. Si lo que se pretende es cuantificar la cantidad de luz azul que produce una fuente de luz, ni el IRC ni la CCT constituyen parámetros óptimos, aunque sí pueden tener valor orientativo y, de hecho, así se están utilizando a falta de sistemas de medida más adecuados.



## 3.2. LA NECESIDAD DE OTRA MÉTRICA PARA LA LUZ AZUL

Observemos que tanto el IRC como la CCT y las coordenadas colorimétricas  $(x,y)$ , están ligados al sistema perceptual humano y es en este ámbito en el que prestan servicios más útiles. Sin embargo, los estudios desarrollados a lo largo de las últimas décadas han demostrado la conveniencia de limitar la cantidad de luz azul inyectada en el medio ambiente nocturno, por motivos de conservación del cielo nocturno, de protección de los ecosistemas y de salvaguarda de la salud humana.

El control de la luz azul se convierte, por tanto, en uno de los aspectos que se deben tener en cuenta a la hora de estudiar la sostenibilidad ambiental del alumbrado de exteriores, y comprobamos que los parámetros que se vienen utilizando hasta ahora para evaluar esta característica (IRC, CCT, coordenadas colorimétricas) solo son orientativos a este respecto y no cumplen bien la función que pretendemos.

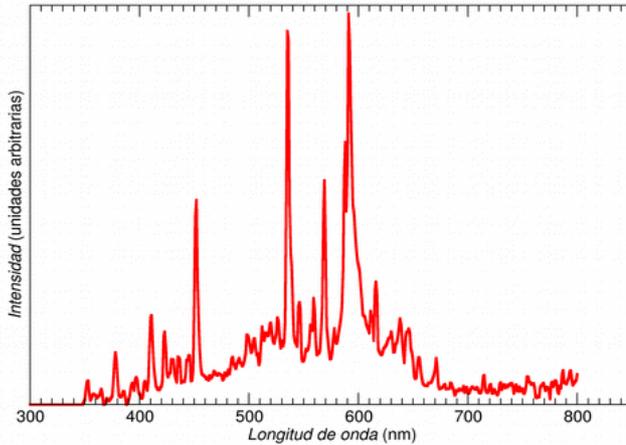
Es necesario, pues, desarrollar un sistema de medida, que cuantifique aquello que se pretende controlar, la luz azul que una lámpara emite por cada unidad de luz visible producida.

## 3.3. G: DEL ESPECTRO A LA MEDIDA

Toda la información sobre la composición de la luz emitida por una lámpara se contiene en una gráfica que recibe el nombre de *espectro*. Esta gráfica representa en el eje horizontal la longitud de onda de la luz. Sabemos que la luz es una onda electromagnética entre cuyas características se encuentra la distancia entre dos crestas consecutivas, o longitud de onda, que es tan minúscula que se mide en unidades pequeñísimas, normalmente en nanómetros.

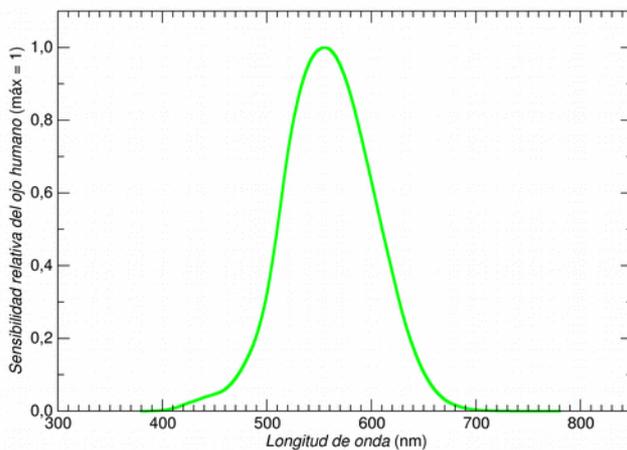
La longitud de onda de la luz visible se extiende entre 470 nm y 780 nm, existiendo una relación entre la longitud de onda y su color percibido, de manera que entre los dos extremos se extienden los colores tradicionales del arco iris: violeta, azul, amarillo, anaranjado y rojo. Para longitudes de onda inferiores a 470 nm se habla de luz ultravioleta, y de luz infrarroja por encima de 780 nm.





**Fig. 2:** Espectro de una lámpara de halogenuros metálicos. Para cada longitud de onda se da la intensidad emitida.

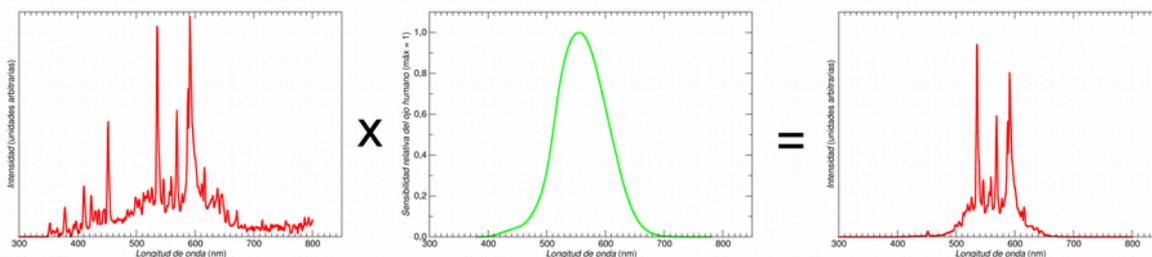
El espectro da para cada longitud de onda, la intensidad de luz emitida por la lámpara.



**Fig. 3:** Curva fotópica de sensibilidad del ojo humano. Esta curva se encuentra en la base del sistema metrológico de la tecnología del alumbrado y forma parte de la definición de unidades como el lumen, la candela, el lux y sus derivados.

El ojo humano no es igual de sensible a todas las longitudes de onda. La curva fotópica muestra que el ojo humano es especialmente sensible a la luz de tonos espectrales puros verdes, pero muy poco a las tonalidades azules y rojizas. Las unidades de medida de la tecnología del alumbrado (candelas, lúmenes, luxes, y sus derivados) están ligadas a esta curva de sensibilidad del ojo humano. Por eso, si se toma el espectro de una lámpara y se multiplica por la curva fotópica, el resultado es la parte del espectro eficaz al ojo humano a efectos de alumbrado.





**Fig. 4:** Primer paso en el cálculo del índice G. Al multiplicar el espectro de la lámpara (izquierda) por la curva de sensibilidad fotópica (centro) se obtiene la parte del espectro correspondiente a la luz visualmente eficaz (derecha). La suma de los valores del resultado arroja una cantidad proporcional a los lúmenes emitidos por la lámpara. Se procede luego de un modo similar para extraer del espectro la parte “azul” (tomando la emisión entre 380 y 500 nm y efectuando su suma).

El índice espectral G permite calcular el contenido de luz azul producida por cada unidad de luz visualmente eficaz. Para un análisis más profundo del mismo se puede consultar el apartado 4 de este documento.

A modo de conclusión cabe destacar que a mayor valor del índice espectral G menor cantidad de radiación azul emite una fuente.

#### 4. CÁLCULO DEL ÍNDICE ESPECTRAL G

El índice espectral G es un parámetro luminotécnico que mide la cantidad de radiación azul de una lámpara por unidad de luz visible o lumen. El valor de G crece cuando la luz azul disminuye. El apartado anterior ofrece una síntesis divulgativa sobre el funcionamiento de este índice. Ahora procedemos a aportar una definición más rigurosa, con apoyo matemático, y a interpretarla en su adaptación al texto legal.

**El dato que nos interesa conocer es la cantidad de luz azul que emite una fuente en relación con la luz total útil que produce.** Para conocer estas cantidades se anula la parte de la radiación del espectro que no interesa mediante el uso de filtros seleccionados previamente.

Un filtro espectral F es una función de la longitud de onda  $\lambda$ ,  $F(\lambda)$ , que adopta valores entre cero y la unidad y selecciona un intervalo determinado de longitudes de onda al multiplicarlo por un espectro de emisión  $E(\lambda)$ . Es decir, dado el espectro de una fuente de luz determinada, se selecciona un filtro que permita el paso de radiación solo en la zona que nos interesa, en el entorno del intervalo en el que el filtro alcanzaría el valor máximo de la unidad.



De este modo, el espectro filtrado  $F(\lambda) \cdot E(\lambda)$  que se obtiene queda anulado en las longitudes de onda en las que  $F(\lambda)$  tenga valor nulo, resulta igual a  $E(\lambda)$  donde  $F(\lambda)$  valga la unidad, y adopta valores inferiores a los de  $E(\lambda)$  en las longitudes de onda, si las hubiera, en las que  $F(\lambda)$  presente valores intermedios. Un ejemplo de este proceso aparece en la figura 4.

Los filtros espectrales utilizados para la obtención del índice espectral G se definen como:

- a) **H380×L500: permite el paso de radiación solo entre 380 y 500 nm.** Es decir, es igual a la unidad para valores de  $\lambda$  entre 380 nm y 500 nm, y nulo para valores de  $\lambda$  fuera de ese intervalo.
- b) **V: permite el paso de radiación solo de la parte del espectro de emisión de la fuente de luz a la que el ojo humano es sensible.** Por tanto, es equivalente a la curva de sensibilidad fotópica de la visión humana definida por los estándares de la Commission International de l'Éclairage, normalizada a máximo unidad. Se representa en la figura 3.

De este modo, el índice espectral G relaciona la radiación que hay que limitar, o sea, la cantidad de luz azul (radiación emitida por debajo de 500 nm, hasta 380 nm) con la radiación útil emitida, o sea, la cantidad de luz visible (radiación que pasa por el filtro fotópico y genera lúmenes útiles).

El anexo I de este documento contiene la justificación del uso de estos filtros espectrales.

El procedimiento de obtención, a partir de los datos espectrales medidos en los laboratorios, es el siguiente:

Dado el espectro E de una fuente de luz y los filtros espectrales H380×L500 y V, definidos todos ellos en función de la longitud de onda  $\lambda$  por las funciones  $E(\lambda)$ ,  $H380 \times L500(\lambda)$ ,  $V(\lambda)$ , el índice espectral G se computa como el resultado de multiplicar por el factor -2.5 el logaritmo decimal del cociente de las integrales de los espectros filtrados, siendo el numerador  $E(\lambda) \cdot H380 \times L500(\lambda)$  y el denominador  $E(\lambda) \cdot V(\lambda)$ .

Las integrales se efectúan respecto de la longitud de onda en el intervalo 380-780 nm.

Las integrales son de interés desde el punto de vista de la definición teórica, pero en la práctica ingenieril y de laboratorio los espectros empíricos están siempre disponibles en forma de tablas discretas, en las que el concepto de integral se reduce a simples sumas. Por eso, con vistas a su aplicación legal, el cálculo práctico del índice espectral G se formula en términos de sumatorios y se establece que las tablas de partida para su cómputo tengan un paso de un nanómetro en longitud de onda. De ahí y de la definición se deduce la fórmula siguiente, a partir del espectro de la fuente de luz  $E(\lambda)$  tabulado con resolución (paso



de la tabla) de 1 nm, y de la función de sensibilidad fotópica de la visión humana  $V(\lambda)$  normalizada a máximo unidad y tabulada con la misma resolución:

$$G = -2.5 \log_{10} \frac{\sum_{\lambda=380 \text{ nm}}^{500 \text{ nm}} E(\lambda)}{\sum_{\lambda=380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} E(\lambda)V(\lambda)}$$

Obsérvese que el filtro H380×L500 desaparece de manera explícita, al quedar sustituido por los límites de suma especificados en el numerador (ahí el espectro se suma solo entre 380 y 500 nm).

Un valor de G nulo indica equilibrio, la lámpara emite la misma cantidad de luz azul que de luz visualmente eficaz.

G crece para fuentes más «rojas», cuanto mayor sea su valor, más luz visible hay, comparada con la emisión azul.

La construcción del índice espectral G le confiere otras propiedades interesantes. Por ejemplo, se puede calcular a partir de cualquier espectro de lámpara con independencia de las unidades de medida en las que venga expresada la intensidad. El índice espectral G no va referido a ninguna fuente patrón: su cálculo utiliza el espectro de cada lámpara como auto-calibrador. Es sencillo de calcular, en el sentido de que los datos que ya se manejan en los laboratorios de luminotecnia para deducir IRC, CCT, etcétera, son más que suficientes para determinar el valor de G de cualquier lámpara. El carácter logarítmico de la escala facilita la comparación de lámparas a través de simples sumas y restas. Además, la escala logarítmica empleada es la que se utiliza en astronomía, de manera que las unidades son las mismas que ya están en uso en estudios de contaminación lumínica para la medida del brillo del cielo en magnitudes por segundo de arco cuadrado, y que ya se van extendiendo a estudios de color en los que, de manera natural, surge exactamente la misma escala de medida en la que se define G.

A fin de facilitar el cálculo de este nuevo indicador, esta Consejería ha desarrollado una sencilla herramienta, en forma de hoja de cálculo, disponible en su [web](#).



## 5. EL ÍNDICE ESPECTRAL G EN EL PROYECTO DE REGLAMENTO ANDALUZ

El índice espectral G se incorpora al proyecto de reglamento para la preservación de la oscuridad natural de la noche frente a la contaminación lumínica con el objeto de establecer los requerimientos ambientales asociados a las fuentes de luz en función de la zona lumínica en que los sistemas de iluminación se encuentren.

En la siguiente tabla se presentan dichos requerimientos espectrales:

Zona lumínica	Índice espectral G
E1, E2 y E3 insertas en E1	$G \geq 2,0$
E3	$G \geq 1,5$
E4	$G \geq 1,0$

En la zona de influencia de un punto de referencia, definida como aquella en la que el observatorio astronómico, declarado como tal, lleva a cabo su actividad, se utilizarán **fuentes de luz ámbar asimilables a monocromáticas**, entendiéndose como tales aquellas cuyo **índice espectral G sea mayor o igual que 3,5**, la longitud de onda efectiva se encuentre en el intervalo 585-605 nm y la anchura del espectro sea menor o igual que 25 nm. La definición de estos conceptos adicionales se puede consultar en los apéndices de este documento.



## ANEXO I: FILTROS PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE ESPECTRAL G

Para el cálculo del índice espectral G se han seleccionado los filtros espectrales H380×L500 y V, en atención a los siguientes criterios:

1. **Filtro H380×L500:** permite el paso de radiación solo entre 380 nm y 500 nm. En 500 nm se encuentra el umbral utilizado con frecuencia en estudios científicos para la valoración de los efectos adversos del uso de luz artificial durante la noche, puesto que es por debajo de esta longitud de onda donde se detectan las mayores perturbaciones. El límite de 380 se establece por motivos técnicos, para facilitar la aplicación en los laboratorios de luminotecnia, dado que todos los laboratorios de certificación emplean espectrógrafos que cubren, al menos, a partir de ese umbral.
  
1. **Filtro V:** Empleamos el símbolo V para representar la curva de sensibilidad fotópica del ojo humano, representada en la figura 2 del cuerpo del documento. Todos los parámetros luminotécnicos, la candela y todas sus unidades derivadas, lumen, lux, etc., se calculan en función de la curva fotópica. Por tanto, para que el índice espectral G se pueda interpretar como cantidad de luz azul por cada lumen producido, es necesario que su cálculo sea compatible con esta escala metrológica. De este modo, el índice espectral G relaciona la radiación que hay que limitar, o sea, la cantidad de luz azul (radiación emitida por debajo de 500 nm, hasta 380 nm) con la radiación útil emitida, o sea, la cantidad de luz visible (radiación que pasa por el filtro fotópico y genera lúmenes útiles).

Cabe añadir que, aunque en el sector del alumbrado, la tendencia actual es utilizar como argumento el predominio del régimen mesópico, esto es adecuado solo en términos teóricos porque en la práctica, lamentablemente, los sistemas de iluminación se diseñan con niveles que conducen al régimen fotópico en la mayoría de los casos. Por otra parte, la candela y sus unidades derivadas siguen representando la base del sistema metrológico en luminotecnia, lo que obliga a emplear la curva fotópica en cualquier caso.



ANEXO II: FÓRMULAS COMPLEMENTARIAS RELACIONADAS CON EL ÍNDICE ESPECTRAL G

Definición de  $G$ :

$$G = -2.5 \log_{10} \frac{\sum_{\lambda=380 \text{ nm}}^{500 \text{ nm}} E(\lambda)}{\sum_{\lambda=380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} E(\lambda)V(\lambda)} = -2.5 \log_{10} \frac{B}{V} = -2.5 \log_{10} Q \quad (1)$$

Donde  $E(\lambda)$  es el espectro de la lámpara y  $V(\lambda)$  representa la curva de sensibilidad fotópica.  $B$  (sumatorio del numerador) es la potencia emitida en el azul y  $V$  (sumatorio del denominador) la potencia visualmente efectiva o flujo visual. Tanto  $B$  como  $V$  se miden en unidades de potencia (o relacionadas) que dependerán de cómo viniera expresado originalmente el espectro  $E(\lambda)$ , pero que son poco relevantes a efectos de la definición de  $G$ , dado que el cociente resulta siempre adimensional. No confundir la curva fotópica  $V(\lambda)$  con el sumatorio  $V$ .  $Q$  es el cociente de los sumatorios.

Definición de longitud de onda efectiva:

La longitud de onda efectiva forma parte de los criterios legales para decidir si una fuente de luz es o no asimilable a monocromática. A efectos prácticos se define de este modo:

$$\lambda_{ef} = \frac{\sum_{\lambda=380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \lambda E(\lambda)}{\sum_{\lambda=380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} E(\lambda)} \quad (2)$$

La longitud de onda efectiva viene a ser la longitud de onda correspondiente al «centro de gravedad» del espectro. Para espectros suaves como los de los cuerpos negros o de las lámparas de tipo LED, esta longitud de onda corresponderá a un valor situado en una zona espectral donde habrá un nivel



considerable de emisión, pero para lámparas de descarga puede quedar situada en lugares donde el nivel de emisión sea uno cualquiera. En teoría el cálculo de este «centro de gravedad» debería extenderse a todo el espectro, pero en la práctica se restringe el cálculo al intervalo de longitudes de onda habitual en el trabajo de certificación de los laboratorios de luminotecnia.

### Definición de anchura del espectro:

El segundo parámetro que interviene en la clasificación de fuentes como asimilables a monocromáticas es la anchura del espectro, que en términos prácticos se define de este modo:

$$\Delta \lambda = \frac{1}{E_{\text{máx}}} \sum_{\lambda=380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} E(\lambda) \quad (3)$$

La anchura del espectro admite una interpretación en términos intuitivos. Se trata de la anchura de la base que habría que dar a un rectángulo que tuviera la misma altura que el punto máximo del espectro, para que el área de ese rectángulo coincida con el área abrigada bajo la curva de la gráfica del espectro original total. De nuevo el cálculo se restringe al intervalo de longitudes de onda habitual en los laboratorios.

### Cociente de potencias $Q$ a partir del índice espectral $G$ :

El índice logarítmico se traduce a cociente despejando  $Q$  en la definición (1):

$$Q = \frac{B}{V} = 10^{-0.4 G} \quad (4)$$

Donde  $B$  representa la potencia azul y  $V$  la potencia eficaz desde el punto de vista visual, y pueden identificarse con los sumatorios de (1).

### Potencia azul emitida :

$$B = V 10^{-0.4 G} \quad (5)$$

$B$  resulta así en las mismas unidades en las que se obtenga la potencia visualmente efectiva,  $V$ , y hay que prestar atención a las unidades del espectro original para asegurarse de que tanto  $V$  como  $B$  salgan en vatios, por ejemplo. Supongamos en adelante que se hace de modo que sea así, entonces normalmente tendremos  $V$  (y también  $B$ ) en vatios,  $V$  [W].



Flujo luminoso  $L$  de la lámpara en lúmenes:

La definición de la candela en el Sistema Internacional, y de sus unidades derivadas (entre ellas el lumen) incluye la constante 683 lm/W:

$$L[\text{lm}] = 683 V[\text{W}] \quad (6)$$

Potencia azul por cada lumen:

$$P_B[\text{W/lm}] = \frac{B[\text{W}]}{L[\text{lm}]} = \frac{V[\text{W}]10^{-0.4G}}{683 V[\text{W}]} = \frac{10^{-0.4G}}{683} = \frac{1}{683 \cdot 10^{0.4G}} = \frac{1}{683 \cdot 10^{\frac{2}{5}G}} \quad (7)$$

Aquí se ve con claridad la consecuencia interesante de que  $P_B$  en vatios por lumen es independiente de las unidades concretas en las que viniera expresado el espectro de partida con el que se evaluó  $G$ . Si se tiene  $G$ , se tienen los vatios azules por lumen. Si además, se conoce el flujo luminoso de la lámpara en lúmenes (porque se deduzca del espectro como 683  $V$ -ecuación (6)- o porque venga etiquetado), la potencia azul total emitida, en vatios,  $B$ , resulta de multiplicar  $P_B$  por los lúmenes, como se muestra a continuación:

Potencia azul total:

$$B[\text{W}] = \frac{L[\text{lm}]}{683} 10^{-0.4G} \quad (8)$$

Lo cual no debe extrañar, dado que  $L[\text{lm}]/683$  es  $V$  en vatios (ecuación (6)), por lo que esta fórmula equivale a la anterior ecuación (5).



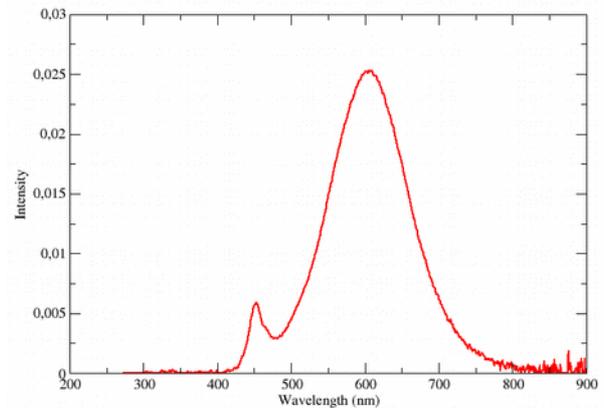
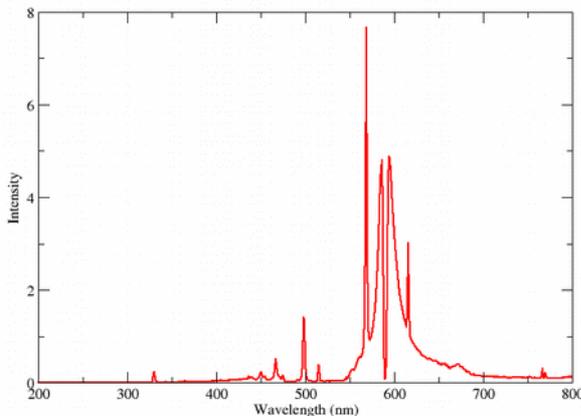
ANEXO III: DOS CASOS PRÁCTICOS

Entre las ventajas del índice espectral  $G$  se encuentra que ofrece la posibilidad de efectuar cálculos numéricos útiles en situaciones de diseño, algo totalmente imposible si se utilizan parámetros como el IRC o la CCT para valorar (de manera necesariamente aproximada) la cantidad de luz azul emitida por una instalación. Vamos a plantear dos casos de diseño, uno en el que se comparan lámparas de vapor de sodio con otras de tipo LED y un segundo que implica LED de tipos diferentes.

Luz azul en el paso desde sodio a alta presión hacia LED

Consideremos una situación de proyecto en la que se sustituyen luminarias equipadas con lámparas de sodio a alta presión (HPS) por otras de tipo LED. La cuestión que nos planteamos es la siguiente: si pretendemos mantener la intensidad de la instalación (potencia lumínica total medida en lúmenes), ¿qué implica este cambio en términos de luz azul total generada?

Ante todo tomemos los espectros de las lámparas. Supongamos que se trata de las siguientes:



El sistema original utiliza lámparas de vapor de sodio a alta presión clasificadas como de CCT = 1880 K, mientras que los LED que las sustituirán se etiquetan como de 2500 K. Pero estos valores no son relevantes en nuestro problema. En su lugar, consideremos los valores del índice espectral  $G$ , que podrían calcularse a partir de los espectros o que podrían constar entre las especificaciones técnicas de las lámparas. En este caso para el HPS tenemos  $G = 2,342$  y para este LED en concreto  $G = 2,044$ . Estos



valores dejan claro que según el índice espectral  $G$  las lámparas HPS son las más «rojas», así que asignamos la etiqueta  $r$  (*red*) al sodio, y la etiqueta  $b$  (*blue*) al LED:  $G_r = 2,342$ ,  $G_b = 2,044$ .

La ecuación (5) del apéndice II puede reordenarse de este modo:

$$V = B \cdot 10^{0.4G}$$

Donde el exponente 0,4 consta ahora positivo por haber cambiado de miembro en el proceso de despejar  $V$ . Si lo planteamos para los dos sistemas de alumbrado:

$$V_r = B_r \cdot 10^{0.4G_r}$$

$$V_b = B_b \cdot 10^{0.4G_b}$$

Pero queremos estudiar el caso en el que la potencia luminosa en lúmenes se mantiene, por tanto  $V_r = V_b$  y podemos escribir:

$$B_r \cdot 10^{0.4G_r} = B_b \cdot 10^{0.4G_b}$$

$$\frac{B_b}{B_r} = 10^{0.4G_r} \cdot 10^{-0.4G_b} = 10^{0.4(G_r - G_b)}$$

Como  $G_r - G_b = 0.290$ , deducimos que  $B_b/B_r = 1,316$  o, dicho de otro modo, la instalación nueva genera una cantidad de luz azul igual a 1,316 veces la original, es decir, tenemos un incremento de luz azul total equivalente a casi un 32 %.

La diferencia de índices  $G$  está relacionada directamente con el incremento o la reducción de la luz azul total de una instalación, a lúmenes constantes.

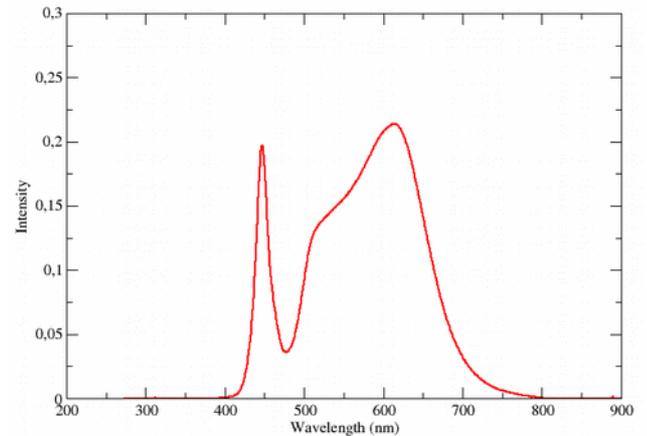
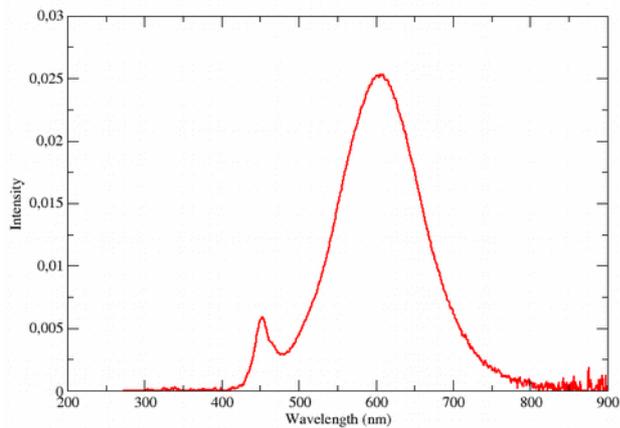
### Limitación de luz azul en un cambio inadecuado de luminarias

En el segundo ejemplo vamos a considerar que se pasa de una instalación con LED de poca emisión azul a otra con una emisión azul excesiva. Obviamente esto no debería hacerse nunca pero, como caso de estudio, nos permite plantearnos: ¿cuánto hay que reducir la intensidad luminosa (lúmenes) para que la cantidad de luz azul total se mantenga en el mismo valor de la instalación original?

Como se ve, esta aplicación es en cierto modo simétrica a la anterior. En este caso partimos de la ecuación (5) del apéndice II tal cual, e imponemos que los valores de  $B$  sean iguales, de ese modo podemos deducir el cociente entre las intensidades luminosas.



Supongamos que las lámparas implicadas tienen los espectros siguientes:



El LED de la izquierda es el mismo del ejemplo anterior y tiene  $G = 2,044$ , mientras que el estudio del espectro de la derecha (o su hoja de especificaciones técnicas) indica  $G = 1,109$ . Ahora el primer LED es más rojo y el segundo el más azul, así que tenemos  $G_r = 2,044$ ,  $G_b = 1,109$ . Por cierto que el segundo viene etiquetado como CCT = 3500 K, aunque este dato no nos sea ahora de utilidad.

De nuevo recurrimos a la ecuación (5) del apéndice II y teniendo en cuenta que  $B_r = B_b$  deducimos:

$$B_r = V_r \cdot 10^{-0.4G_r}$$

$$B_b = V_b \cdot 10^{-0.4G_b}$$

$$V_r \cdot 10^{-0.4G_r} = V_b \cdot 10^{-0.4G_b}$$

$$\frac{V_r}{V_b} = 10^{0.4(G_r - G_b)}$$

Como la diferencia de índices es  $G_r - G_b = 0.935$ , tenemos que  $V_r/V_b = 2,366$ , es decir, si se pretende mantener la cantidad de luz azul producida, entonces hay que dividir la potencia luminosa instalada entre 2,366, equivalente a un factor 0,423. Se requiere reducir la potencia del alumbrado a un 42 % de la original si no se quiere inyectar más luz azul en el entorno.

