LII Simposium Nacional de Alumbrado
Lleida, 20 al 22 de mayo del 2026
Ponencia

Título del trabajo/ Title of paper:

"Iluminar con equilibrio: innovación, biodiversidad y eficiencia en una sociedad 24/7"

Autor/es/ Author/s:

María del Mar Gandolfo de Luque

Empresa/s Company/s:

Signify

Dirección principal/ Mail address:

C/María de Portugal nº1, 28050, Madrid

Teléfono, e-mail de la persona de contacto/
Phone, e-mail address of the contact person:

Mar.gandolfo@signify.com
Tlno: 629166555

Tema:

1. Científico y formación en aspectos generales de la iluminación: visión, color, fotometría, luminotecnia…….
2. Luz, salud y bienestar
3. Normativa, Legislación, Calibración y Certificación
4. Iluminación interior
5. Iluminación conectada en interior
6. Sistemas de control y equipos auxiliares
7. Eficiencia energética y empresas de Servicios energéticos
8. Ciudades inteligentes e iluminación conectada en exterior
9. Gestión de fondos y ayudas para el ahorro
10. Otros usos de la luz
11. Novedades tecnológicas
12. Realizaciones prácticas
13. Contaminación lumínica
14. Energías renovables
15. Alumbrado de emergencia

La iluminación artificial constituye un elemento esencial en la vida moderna. Las instalaciones correctamente diseñadas, que incorporan productos de calidad y sistemas avanzados de control, son fundamentales para crear entornos adecuados para la movilidad urbana e interurbana, el trabajo, el ocio, el deporte y otras actividades. Una iluminación bien planificada no solo facilita estas funciones, sino que también aporta bienestar, confort, seguridad y protección, contribuyendo de manera directa al desarrollo económico.

Iluminamos para satisfacer las necesidades visuales humanas, pero esta intervención impacta inevitablemente en el entorno. Por ello, en cualquier aplicación de iluminación es imprescindible considerar los efectos sobre el medio natural, incluyendo la fauna y la flora, así como la luz intrusiva, el resplandor del cielo y las molestias lumínicas. El diseño responsable exige equilibrar las necesidades funcionales con las preocupaciones ambientales, extendiendo este compromiso a la selección de materiales, su huella de carbono, la economía circular y la eficiencia energética
Por ello un buen proyecto de iluminación debe estar equilibrado al menos en los aspectos que se indican a continuación*:*



El objetivo principal es garantizar que usamos la iluminación adecuada cuando y donde se necesita, sin iluminar de forma excesiva, pero sin quedarnos cortos respecto a las necesidades humanas. En el campo de la iluminación hay una larga trayectoria e investigación sobre los requisitos de iluminación y la calidad de las instalaciones.

La ponencia quiere recoger elementos comparativos para alcanzar este equilibrio diferenciando instalaciones en una gran ciudad, un pueblo, o un área de alta protección medioambiental o calidad del cielo.

Se tendrán en cuenta criterios sobre los valores mínimos de los niveles de iluminación, uniformidades, deslumbramientos, confort visual, huella de carbono a lo largo de toda la vida de la instalación y coste energéticos asociados al uso de la instalación.

Si bien resulta complejo considerar la totalidad de los factores implicados, incorporar el mayor número posible en el análisis permite juzgar razonablemente y adoptar soluciones más sostenibles en su conjunto. Este enfoque evita decisiones basadas en un único criterio y promueve la optimización integral del proyecto, contemplando aspectos funcionales, energéticos, ambientales y de impacto social.
Entremos en detalle de cada uno de estos elementos sin poder ser exhaustivos por la limitación de tiempo a la hora de exponer la ponencia pondremos algunos ejemplos y no analizaremos en profundidad cada una de las partes.

1. Necesidades visuales humanas: seguridad y confort de las personas

La seguridad que nos proporciona la luz es algo que en la sociedad actual en ocasiones la damos por descontado, pero no siempre ha sido así, y aún hoy en día hay lugares del mundo que al carecer de electricidad no tiene posibilidad de proporcionar seguridad en la noche. El relato de la historia del Alumbrado Público comienza con la historia sobre la de luz y el alumbrado y está determinado por la evolución del hombre y sus requerimientos de confort en las diversas épocas de la historia.

La historia del alumbrado público es el resultado de una larga evolución tecnológica estrechamente ligada al desarrollo social, económico y cultural de la humanidad. Desde que el ser humano descubrió el fuego, la luz artificial ha sido fundamental para garantizar seguridad, extender la actividad nocturna y mejorar la calidad de vida. Durante milenios, la única fuente de luz fue la llama. Con el tiempo, surgieron tecnologías primitivas como las lámparas de cazoleta de la Edad de Piedra, que utilizaban aceites animales o vegetales. Más adelante, en la época romana, se introdujo la vela, lo que permitió una iluminación portátil y accesible.
El alumbrado público comenzó a tomar forma con las lámparas de aceite, cuya evolución consiguió en el siglo XVII con la luminaria diseñada por Jan Van der Heyden iluminar las calles de Ámsterdam. Un gran salto tecnológico llegó con el quemador tubular de Argand en el siglo XVIII, que supuso el inicio de la ingeniería moderna del alumbrado. Los avances se aceleraron entre los siglos XIX y XX: el gas con camisa incandescente, la lámpara incandescente eléctrica y posteriormente las lámparas de descarga marcaron hitos que transformaron la iluminación urbana.
A finales del siglo XX llegaron las tecnologías de estado sólido (LED/SSL), que abrieron la puerta a sistemas más eficientes y duraderos. Los sistemas de iluminación no han sido nunca tan eficientes como desde la llegada del LED, pero al mismo tiempo se generó una alarma sobre si el espectro luminoso (aparentemente más rico en componentes azules que otras fuentes de luz) y su reducido tamaño hacen de esta fuente luminosa un peligro para la salud humana, el medioambiente y la oscuridad del cielo nocturno. En los últimos 25 años la ciencia de la iluminación ha adaptado sus conocimientos a esta nueva fuente de luz y así ha desarrollado luminarias mucho más eficientes incorporando ópticas capaces de dirigir la luz donde se necesita, ha tenido al mismo tiempo que aprender a controlar el deslumbramiento de una matriz de pequeñas fuentes luminosas en lugar de una sola y de mayor tamaño, y a seleccionar adecuadamente la multitud de posibilidades en temperaturas de color e índices de reproducción cromática que están disponibles e incluso a jugar con el color.

El alumbrado público ha sido decisivo para el desarrollo urbano tras la Revolución Industrial, permitiendo ampliar las actividades comerciales, culturales y sociales más allá del anochecer.

En suma, la evolución del alumbrado ha acompañado y posibilitado el progreso humano, pasando de simples antorchas a sistemas avanzados de iluminación que hoy consideramos esenciales. Junto a la evolución técnica, se necesitan proyectistas, técnicos en iluminación que conozcan la ciencia de la luz y la iluminación y la pongan al servicio de las necesidades visuales humanas, no solo es importante conocer los valores, sino los conceptos que tras ellos se esconden para usarlos adecuadamente.

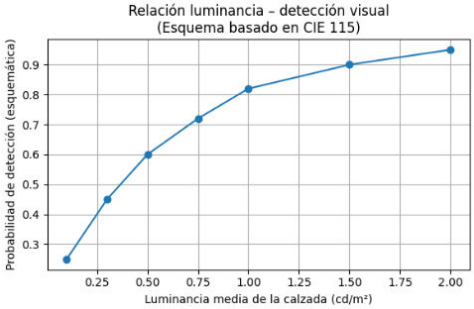
Cuando se decide iluminar un espacio para ser usado por personas que necesitan moverse en la noche andando, en coche o con cualquier otro medio de transporte ya sean transportistas, trabajadores de un turno nocturno, personas que vuelven a casa después de una jornada laboral o simplemente personas que quieren disfrutar de unas horas libres después de la puesta del sol nos preguntamos ¿qué nivel de iluminación debemos usar? ¿qué criterios debemos tener en cuenta a la hora de iluminar un espacio?

Desde un punto de vista técnico, las respuestas a estas preguntas para aquellas personas que tienen responsabilidad sobre el alumbrado vial, se encuentran en la **UNE-EN 13201 y en particular en UNE_EN 13201 parte 2** (Iluminación de carreteras. Parte 2: Requisitos de prestaciones). La norma define los requisitos fotométricos que debe cumplir el alumbrado vial para garantizar seguridad y visibilidad en carreteras, calles, zonas de conflicto y áreas peatonales. Establece criterios de luminancia, iluminancia, uniformidad, limitación del deslumbramiento, y condiciones específicas para tráfico motorizado, áreas conflictivas, peatones y ciclistas, incluyendo tablas y clases de alumbrado aplicables

Es importante tener en cuenta que La norma **UNE-EN 13201** se fundamenta en décadas de investigación científica desarrollada y sintetizada por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE). **El informe técnico CIE 115:2010** constituye la base principal para la definición de los niveles de luminancia e iluminancia exigidos en alumbrado vial. La CIE no basa sus recomendaciones en un único estudio, sino en la convergencia de tres tipos de evidencia: **experimentos psicofísicos de laboratorio**, estudios dinámicos en **simuladores de conducción y análisis de accidentes en condiciones reales**. Solo cuando los resultados son coherentes en los tres niveles se consideran válidos para su traslado a recomendaciones normativas.

Experimentos psicofísicos de laboratorio

Estos experimentos evaluaron la capacidad humana de detectar objetivos pequeños y de bajo contraste bajo visión mesópica. Se variaron de forma controlada la luminancia del fondo, el contraste del objeto y el deslumbramiento. Los resultados mostraron umbrales claros de luminancia por debajo de los cuales la probabilidad de detección desciende bruscamente, justificando la existencia de niveles mínimos discretos



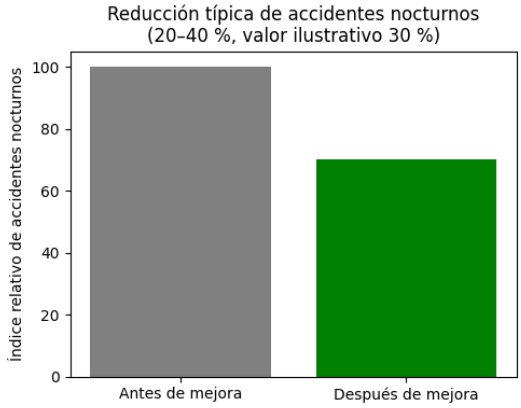
Relación esquemática entre luminancia de la calzada y probabilidad de detección visual. El gráfico es ilustrativo y representa tendencias observadas en estudios recopilados por la CIE.

Experimentos en simuladores de conducción

Los simuladores permitieron evaluar la conducción como tarea dinámica, incorporando velocidad, atención y tiempo de reacción. Se observó que reducciones de luminancia del orden de una clase M incrementan el tiempo de reacción entre 0,2 y 0,6 segundos, lo que a velocidades urbanas supone varios metros adicionales recorridos antes de reaccionar ante un obstáculo.

Estudios de campo y análisis de accidentes

La CIE revisó estudios antes y después realizados en carreteras reales. Estos estudios compararon el número de accidentes nocturnos antes y después de la instalación o mejora del alumbrado. De forma consistente, se observaron reducciones significativas de accidentes, especialmente en entornos urbanos e intersecciones.



Ejemplo esquemático de reducción de accidentes nocturnos tras mejora del alumbrado.

Valores ilustrativos dentro de los rangos documentados por la CIE (20–40 %).

Veamos un par de ejemplos de cómo el conocimiento respecto a las necesidades visuales se aplica a la iluminación:

Cuando se requiere iluminar una calzada y al mismo tiempo intentar minimizar los efectos adversos que puede tener la luz en la noche lo importante es saber determinar los criterios técnicos necesarios para que la iluminación cumpla con los requisitos necesarios según el tipo de vía, velocidad, dificultad en la orientación, tipos de usuarios y el resto de las características que en la norma se definen, sin exceder los mismos y cuidando especialmente que la luz no se disperse sobre áreas que no se desean iluminar. Pero sería un error iluminar con niveles inferiores a los necesarios puesto que esto puede conllevar que los conductores que circulan a velocidades elevadas no tengan el suficiente tiempo de reacción ante una adversidad debido a una menor capacidad visual, que se traduce en un mayor tiempo de reacción hasta que se percibe el objeto y como consecuencia el vehículo recorrerá más metros hasta que se pisa el freno y consigue detenerse o realizar una maniobra de evasión. Si nos fijamos en los requerimientos recogidos en la norma para las clases de alumbrado para vehículos motorizados, clases M, la luminancia media que refleja el nivel general de luminosidad de la calzada para el conductor, recoge otros parámetros importantes que van correlacionados con el nivel de la luminancia para asegurar la capacidad visual del conductor como son: la Uniformidad general (U_o) que mide la variación de las luminancias e indica qué tan bien sirve la superficie de la carretera como fondo para detectar objetos y marcas; la Uniformidad longitudinal (U_l) que proporciona una medida de la visibilidad del patrón repetido de manchas brillantes y oscuras en tramos largos e ininterrumpidos

de carretera; el Incremento del umbral (f_{TI}) que indica el grado de deslumbramiento perturbador causado por la instalación y la Relación de iluminancia del entorno(R_{EI}) que asegura que las áreas inmediatamente adyacentes a la calzada (como los arcenes o aceras) estén adecuadamente iluminadas para revelar objetos o usuarios en el borde de la vía, la tabla añade un criterio adicional que puede aplicarse para condiciones de carretera mojada para evitar una degradación seria del rendimiento durante periodos de humedad (U_{ow})

Las clases de alumbrado **M** se refieren a vías con tráfico **M**otorizado y cuanto menor es el número que acompaña a la letra M, mayores son los requisitos visuales. Como puede verse en la tabla cuanto mayor es requerimiento visual no solo se debe incrementar el nivel de iluminación sino también el valor de la uniformidad y la reducir el posible deslumbramiento.

Clases de alumbrado M

Clase	L (cd/m²) [mín. mantenido]	U_o [mínimo]	U_l [mínimo]	U_{ow} [mínimo, mojado]	f_{TI} (%) [máximo]	R_{EI} [mínimo]
M1	2,00	0,40	0,70	0,15	10	0,35
M2	1,50	0,40	0,70	0,15	10	0,35
M3	1,00	0,40	0,60	0,15	15	0,30
M4	0,75	0,40	0,60	0,15	15	0,30
M5	0,50	0,35	0,40	0,15	15	0,30
M6	0,30	0,35	0,40	0,15	20	0,30

En esta tabla vemos los requerimientos que una clase determinada debe cumplir pero, ¿cómo evaluar qué clase de alumbrado del M1 al M6 debería considerarse para la vía que se desea iluminar? para ello nos podemos ayudar de normativa **CEN/TR 13201-1** donde encontramos una serie de indicadores que van desde de la velocidad permitida para el tráfico rodado, tipo de vehículos que podemos encontrar, densidad de tráfico, dificultad de la tarea por el entorno luminoso, cantidad de incorporaciones y salidas que tenga la vía. En función de todos los parámetros se determina si se necesita una iluminación más o menos exigente.

Considerando como ejemplo la M-30 o M-40 en Madrid, por su alta velocidad, volumen de tráfico extremo, complejidad de navegación y entorno urbano luminoso, la aplicación de la normativa CEN/TR 13201-1 sugiere que la M-30 y la M-40 requieren los niveles de seguridad visual más altos, correspondientes a la clase M1 según la evaluación por ponderación

1. Evaluación mediante el Método de Ponderación (V_{WS})

Según la fórmula **Clase M = 6 - V_{WS}**, una vía se clasifica como **M1** si la suma de sus valores de ponderación (V_{WS}) es **igual o mayor a 5** [1].

Al aplicar los parámetros de la **Tabla 1** a estas vías, obtenemos los siguientes valores estimados:

- **Velocidad de diseño (v):** La M-40 suele tener tramos de ≥ 100 km/h **(+2)** y la M-30 tramos de $70 < v < 100$ km/h **(+1)** [2].
- **Volumen de tráfico:** Ambas tienen un volumen muy alto, superando frecuentemente el 65% de su capacidad máxima **(+1)** [2].
- **Densidad de cruces/enlaces:** Dada su naturaleza de circunvalación con salidas constantes, ambas presentan una alta densidad **(+1)** [3].
- **Luminosidad ambiental:** Al ser vías urbanas o de entorno metropolitano con alta iluminación comercial y publicitaria en sus márgenes, se consideran de luminosidad alta **(+1)** [3].
- **Tarea de navegación:** Debido a la complejidad de sus enlaces y el número de carriles, la tarea se califica como difícil o muy difícil **(+1 o +2)** [4].

Resultado: La suma de estos factores para ambas vías oscila entre **5 y 7**. Como la norma indica que si el resultado es ≤ 0 se debe aplicar la clase **M1**, estas carreteras alcanzan el nivel de exigencia máximo [1].

Con la clase de alumbrado ya definida, M1, en la tabla encontramos los valores con los que deberíamos iluminar: una luminancia media mantenida de 2 cd/m^2; con uniformidad global de 0,4 y longitudinal de 0,7 y el límite de deslumbramiento perturbador debería ser como máximo 10%; manteniendo una relación con el entorno de 0,35.

¿Por qué no elegir un nivel menor como podría ser los requisitos de una clase M3? Si elegimos una clase de alumbrado de requerimientos inferiores, podríamos ahorrar energía y quizá al bajar el nivel de iluminación tener una mejor protección de cielo nocturno, aunque para estar seguros habría que considerar la emisión directa que puede darse al permitir un incremento umbral superior en la clase M3 respecto a la M1, pero en mi opinión (como técnica en iluminación y como usuaria diaria de esas vías) y creo que en la de muchos expertos que durante los últimos casi 100 años han desarrollado las normativas de iluminación para seguridad vial, la repuesta sería que estaríamos iluminando por debajo de las necesidades viales de los conductores, sigamos adelante con el ejemplo**.**

La elección de 2 cd/m² en M1 se apoya explícitamente en los modelos psicofísicos de visibilidad (Blackwell, Barten) utilizados por la CIE para garantizar que la detección de objetos se produzca con suficiente antelación para que la distancia de detención sea compatible con la velocidad

Fundamento visual: sensibilidad al contraste (Blackwell y Barten)
Las dos referencias técnicas más importantes:

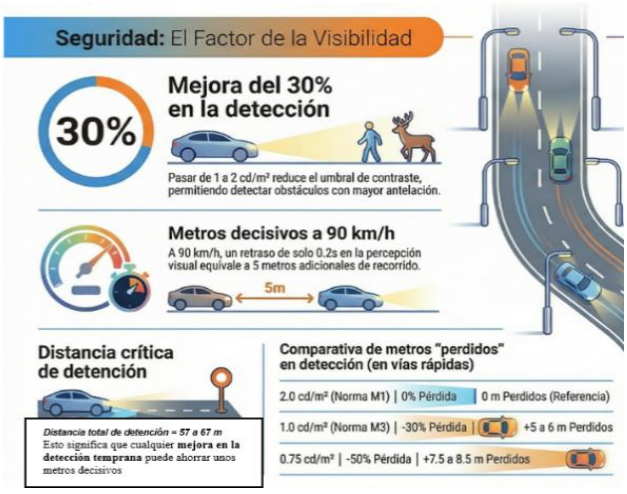
- **Blackwell (1946)**: establece umbrales de contraste detectables para distintos niveles de luminancia, a partir de más de 400.000 observaciones científicas. Los umbrales caen entre 0,02–0,03 a 1 cd/m² y entre 0,015–0,02 a 2 cd/m².

- **Modelo de Barten (1999–2003)**: confirma matemáticamente la mejora de sensibilidad conforme aumenta la luminancia (CS ∝ √L en mesópico y logarítmica en fotópico).
  A valores de 1 cd/m² la sensibilidad típica es 100–150, y a 2 cd/m² sube a 150–200.

Según estos criterios veamos el impacto que tendremos sobre la distancia de detección en una vía a 90 km/h
Un conductor a 90 km/h recorre **25 m/s**. Retrasar la detección por pérdida de contraste implica aumentar la distancia recorrida antes de frenar. Teniendo en cuenta los valores aproximados del umbral de contraste (C_{th}) según luminancia a partir de los rangos de Blackwell:

Luminancia (cd/m²)	***C_{th} típico (rango)***	***Variación relativa***	***Interpretación visual; metros recorridos de más a 90km/h***
0,75	*0,03–0,04*	*+50% peor que 2 cd/m²*	*Riesgo serio de no detección; 7,5-8,5m*
1,0	*0,02–0,03*	*+30% peor que 2 cd/m²*	*Visibilidad aceptable pero reducida; 5-6m*
1,5	*0,017–0,022*	*+10–15% peor que 2 cd/m²*	*Cercano al óptimo; 2,5m*
2,0 (M1)	*0,015–0,02*	*—*	*Máxima probabilidad de detección; 0m*

Podemos estimar el impacto de la pérdida de sensibilidad al contraste, reducir de 2 → 1,5 cd/m² implica ≈10% menos sensibilidad que se traduce en un retraso ≈0,1 s, lo que puede suponer **2,5m** adicionales recorridos; reducir de 2 → 1 cd/m² implica ≈30% menos sensibilidad que se traduce en un retraso≈0,2–0,25s pudiendo en este caso añadir entre **5–6 m** adicionales; y reducir de 2 → 0,75 cd/m² implica ≈50% menos sensibilidad se traduce en un retraso ≈0,3–0,35 s convirtiendo este tiempo de reacción en unos **7,5–8,5 m** adicionales. En conducción nocturna estos metros son críticos



*En el marco de la ingeniería de alumbrado viario, la elección de **2 cd/m²** para vías de **alta velocidad (≥ 90 km/h)** está ampliamente justificada con base en:*

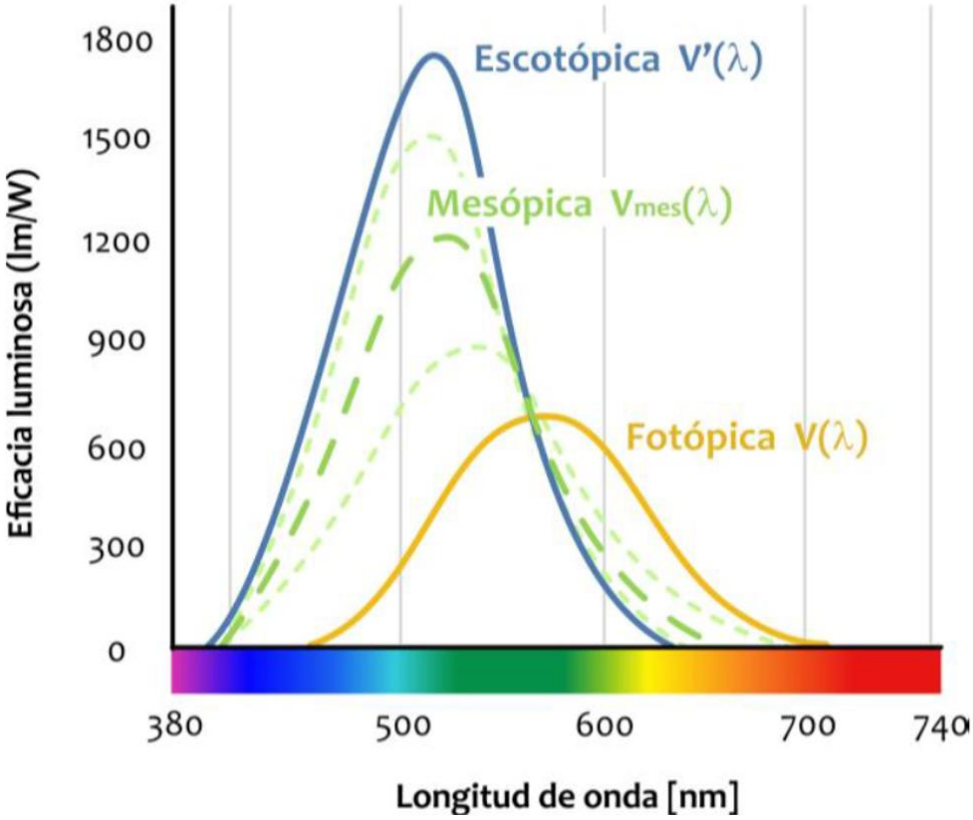
***Datos experimentales**: el umbral de contraste mejora ~30 % al pasar de 1 a 2 cd/m² (Blackwell).*
***Modelos analíticos**: la sensibilidad visual aumenta notablemente con la luminancia (Barten).*
***Seguridad vial**: las distancias de reacción y frenado requieren maximizar la capacidad de detección temprana.*
***Normativa internacional**: CIE 115 define 2 cd/m² para la clase M1 usada en vías rápidas.*

*Por tanto, la adopción de **2 cd/m²** **garantiza la máxima probabilidad de detección y la seguridad de frenado exigida para carreteras de alta velocidad**, de acuerdo con los principios psicofísicos (Blackwell, Barten) y las recomendaciones normativas (CIE 115, EN 13201).*

Veamos otro ejemplo, ahora considerando uno de los últimos informes técnicos de la Comisión internacional de iluminación. Este ejemplo va a estar más relacionado con criterios para vía de velocidad reducida o zonas peatonales, para ello nos basamos en el **informe Técnico CIE 257:2026**: “Aplicación Práctica del Sistema CIE para la

Fotometría Mesópica en Iluminación Exterior". El objetivo principal es proporcionar directrices para la implementación del sistema de fotometría mesópica (definido originalmente en CIE 191:2010) en aplicaciones de iluminación exterior, específicamente para conductores y peatones.

La fotometría mesópica es altamente relevante para tareas visuales periféricas (detección fuera del eje) y la percepción del brillo espacial (seguridad percibida), pero no es aplicable a tareas que se realizan en la fóvea como la lectura de señales o el reconocimiento facial.



Fundamentos de la Visión Mesópica

La visión mesópica se define como el estado intermedio entre la visión fotópica (dominada por conos) y la escotópica (dominada por bastones). En este estado, ambos tipos de fotorreceptores contribuyen a la función visual.

La mayoría de los entornos de tráfico nocturno operan en la región mesópica. Los niveles de luminancia típicos recomendados para carreteras (clase M) oscilan entre **0,3 cd·m⁻² y 2,0 cd·m⁻²**. Para zonas de conflicto y peatones, los niveles equivalentes tras la conversión de iluminancia a luminancia suelen estar entre **0,14 cd·m⁻² y 3,5 cd·m⁻²**, situándose claramente por debajo del límite superior mesópico de **5 cd·m⁻²**.

En el **informe técnico CIE 257(2026)**:" Recomendaciones para aplicaciones prácticas del sistema CIE para fotometría Mesópica en alumbrado exterior", encontramos una explicación útil sobre los experimentos comparando fuentes de luz de bajo ratio S/P

inferiores a 0,6-0,8 típicamente fuentes de luz muy cálidas 1800k y 2200k frente a otras con ratios S/P superiores a 1-1,5 como son las fuentes de 2700K y 3000K o superiores. Las fuentes de luz en que se basan lo informes son fuentes de luz de descarga y no LED y esto puede tener una influencia en la reproducción cromática de las fuentes estudiadas respecto a los LED, pero el informe lo que explica es como usar los valores de los ratios S/P de las fuentes de luz, la relación entre visión Escotópica/Fotópica. Con valores bajos de iluminación, el ratio S/P tiene una influencia importante a la hora de percibir obstáculos en la visión periférica, puesto que cuanto más bajo es el nivel de iluminación más importancia asumen los bastones que se encuentran en la periferia de la retina para proporcionar información al cerebro. Y esta es también la razón por la que un espacio iluminado con una fuente de 3000K parezca más brillante y proporcione mayor sensación de seguridad que uno iluminado con 1800K.
La imagen recoge un resumen de las diferencias entre usar una fuente de luz de un bajo relación S/P como sería una fuente de luz de 1800K o 2200k o una fuente de luz que siendo todavía cálida proporciona un valor más elevado a la relación S/P como son las fuentes de luz de 2700K o 3000K



La detección de un objeto que entra por el lateral de la calzada es una tarea de **visión periférica** (fuera del eje). Es aquí donde el sistema mesópico es más relevante porque en la periferia de la retina hay una alta concentración de bastones.

- **Fuentes de bajo S/P (1800K - 2200K)**: Al tener menos energía en la zona azul/verde del espectro (a la que son sensibles los bastones), el ojo es menos eficiente. Los estudios (He et al., Bullough y Rea) demuestran que con estos ratios bajos, la **tasa de detección disminuye** (más "fallos") y los **tiempos de reacción son más largos**.

- **Fuentes de alto S/P (2700K - 3000K y superiores)**: Estas luces "más blancas" activan mejor los bastones en la periferia. Los resultados experimentales confirman que los conductores tienen **tiempos de reacción sistemáticamente más cortos** bajo estas fuentes en comparación con las luces amarillentas

El informe vincula directamente la rapidez de detección con la capacidad de respuesta del conductor:

- **Detección temprana**: Un ratio S/P más alto (como es el de una fuente de 3000K frente a una de 1800K) permite que el conductor perciba el movimiento lateral del objeto **antes**, reduciendo el tiempo de procesamiento visual.

- **Tráfico de baja velocidad**: En calles urbanas o residenciales, esta ganancia en milisegundos es crítica. El informe indica que, para tráfico de baja velocidad, mejorar la detección periférica mediante un espectro con mayor ratio S/P permite que la **distancia de frenado sea suficiente** para evitar una colisión.

- **Tráfico de alta velocidad**: Curiosamente, el informe **no recomienda** basar el diseño de autopistas en el sistema mesópico. A altas velocidades, el conductor necesita detectar peligros a distancias tan largas que el objeto aparece inicialmente en su **visión foveal** (en el eje), donde los bastones no actúan y el beneficio del ratio S/P desaparece.

- Un **valor mayor S/P** hace percibir el **espacio como más luminoso y seguro**

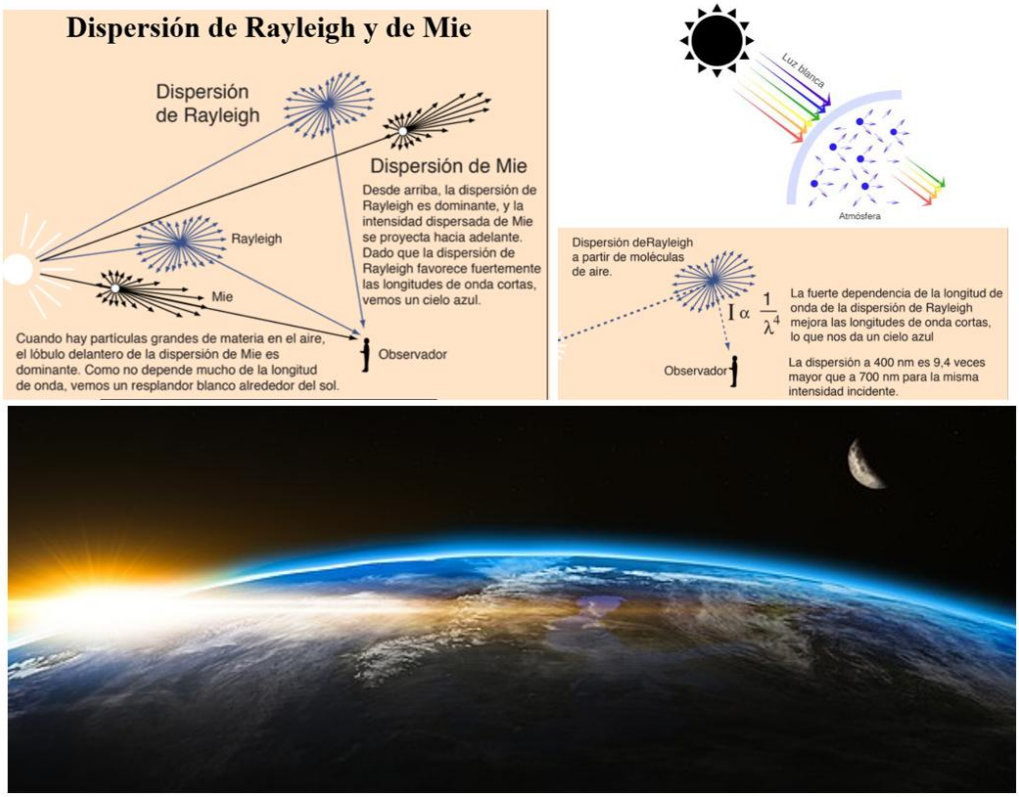
Resumen práctico: Si un objeto entra por el lateral, una fuente de **3000K** (S/P ~1,23) proporcionará una detección más rápida y segura que una de **1800K** (S/P ~0,55), ya que la primera aprovecha mejor la sensibilidad nocturna de la visión periférica del conductor.
El sistema CIE para fotometría mesópica es una herramienta robusta para predecir el brillo espacial y la detección periférica. Sin embargo, la elección de una fuente de luz no debe basarse únicamente en la eficacia mesópica.

Factores adicionales para la selección de fuentes de luz:
- *Reconocimiento y reproducción del color.*
- *Deslumbramiento molesto (especialmente para personas mayores).*
- *Impacto ambiental (brillo del cielo, efectos en flora y fauna).*
- *Salud y bienestar humano.*
- *Atención y alerta del usuario.*

2. Protección del cielo nocturno, consideraciones ecológicas y salud humana

Cuando se trata de preservar la oscuridad de la noche para poder disfrutar de un cielo estrellado, el diseño completo de la iluminación juega un papel esencial y debe minimizar la luz emitida al hemisferio superior directamente, y la que pueda llegar por reflexión, siendo especialmente significativa la luz que se dispersa no directamente hacia la vertical sino la que escapa de las luminarias en los ángulos más próximos a la horizontal puesto que por las diversas leyes físicas que veremos a continuación puede propagarse a mayores distancias. Por ello el uso en este caso de distribuciones fotométricas adecuadas a cada tipo de calzada o área a iluminar es el criterio fundamental para tener en cuenta, buscando optimizar la utilancia.

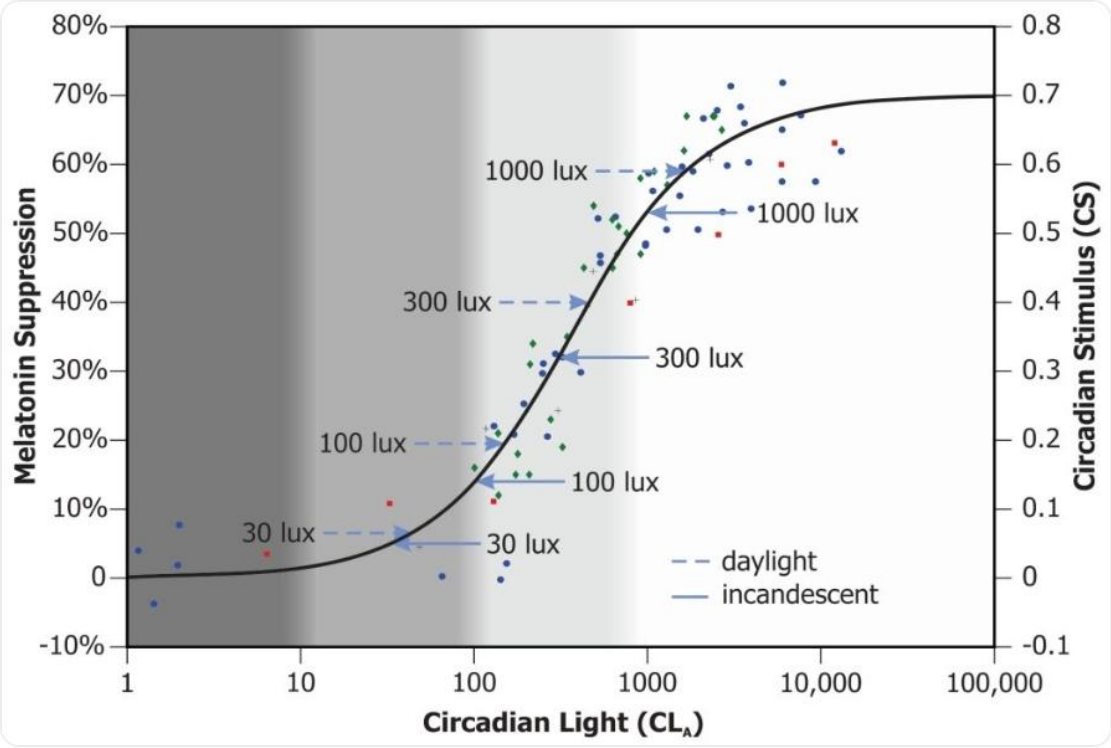
Lo dicho hasta ahora sobre los niveles de iluminación necesarios para asegurar la visibilidad de las personas y el hecho de que el aumento temperatura de color, o mejor un valor más elevado de la relación S/P y por lo tanto una mayor componente de azul de la fuente de luz para niveles de iluminación mesópico permita una mejor visibilidad periférica entra en conflicto con algunos criterios que se están demandando para la protección del cielo nocturno y la biodiversidad. Para la protección del cielo debido al esparcimiento de Mie y Rayleigh por las cuales las longitudes de onda más cortas (colores azules) se dispersan en el cielo más que otros colores, en el caso de la dispersión de Mie se produce cuando el tamaño de las partículas que se encuentran en la atmosfera es del tamaño de la longitud de onda, mientras que la dispersión de Rayleigh se produce para tamaños de 1/10 la longitud de onda, en el primer caso la dispersión es inversamente proporcional a la longitud de onda, los colores azules se dispersan más, pero no tanto como en el segundo caso donde la dispersión es inversamente proporcional a la longitud de onda elevada a la cuarta potencia. Por estas leyes de la física las fuentes de luz con más cantidad de luz azul en su espectro pueden producir mayor contaminación lumínica.



Respecto a las consideraciones sobre la fauna y flora, aquí la cosa se complica enormemente, puesto que la variedad de animales y flora es muy grande y a cada especie puede afectar la luz de modo distinto.
No voy, por tanto, a analizar en este sentido la componente de luz azul en sí de las fuentes de luz, sino la consideración básica de iluminar solo aquellas zonas que sean necesarias para la seguridad y confort real de las personas y durante el tiempo que sea necesario.

Respecto a la salud de las personas en relación con luz en la noche debemos tener en cuenta que a principios del siglo XXI se identificó un tercer fotorreceptor en el ojo, que

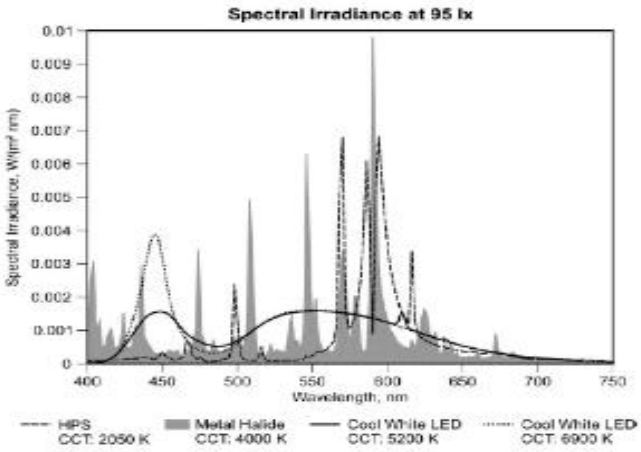
se denomina célula ganglionar fotosensible o ipRG, que no está encargado de enviar información al cerebro para ver, sino que estas células tienen una conexión con el "reloj biológico" el Núcleo Supraquiasmático (NSQ) y este a su vez tiene una conexión nerviosa con la glándula pineal que es la encargada de la regulación de ciertas hormonas, así existe una relación directa entre la luz, los tiempos en que se recibe la luz (tanto la duración de la exposición, como el momento del día y la historia), la intensidad que se recibe y las hormonas. La luz ejerce un efecto visual y también uno no visual, por lo que es importante para nuestra salud.
Este tercer fotorreceptor, es especialmente sensible a las longitudes de onda más cortas o color azul, de ahí la preocupación de no usar fuentes de luz con un importante componente de azul cuando iluminamos en horas nocturnas, tras la puesta del sol, mientras que parece importante recibir suficiente dosis de luz azul durante el día para un buen control de nuestro reloj biológico.
Aun se necesita más investigación sobre el efecto de la luz en el biorritmo humano, pero en las investigaciones que se han llevado a cabo hasta ahora se considera que para tener un efecto importante sobre la supresión de la melatonina se necesitan niveles de iluminación circadianos, es decir verticales a nivel de la pupila del observador, superiores a los que se utilizan en el alumbrado público.



En la gráfica puede observarse como niveles de iluminación circadiana por debajo de 30lux tienen un efecto prácticamente nulo en la supresión la melatonina ya se trate de fuentes de luz cálidas (incandescentes) o fuentes de luz frías (luz día), en la medida que vamos incrementando los niveles de iluminación la supresión de la melatonina para el mismo nivel de luz si se ve afectada por las temperaturas de color, siendo mayor con las temperaturas de color más frías. En situaciones reales de iluminación a niveles de alumbrado público indican que la temperatura de color de la fuente de luz por debajo de 5200k no tiene influencia apreciable en la inhibición de la melatonina,

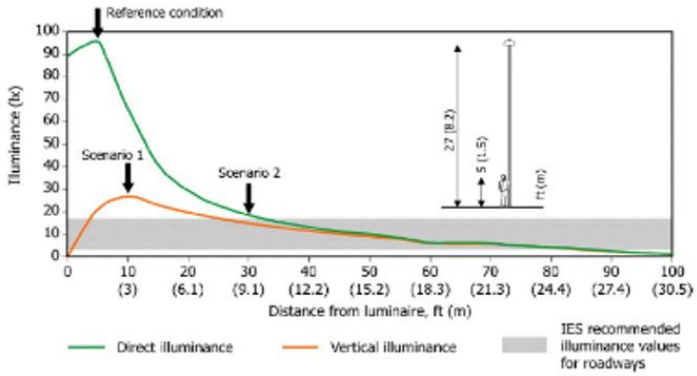
ejemplo de ello son estos dos estudios realizados teniendo en cuenta situaciones reales con niveles típicos de un alumbrado público:

El primer ejemplo a cargo de: Dra. Mariana Figueiro; Dr. Mark Rea y Andrew Bierman, intenta responder a la pregunta ¿Estimulan el sistema circadiano lo niveles de iluminación exterior vial?
En la investigación midieron la supresión de la melatonina por causa de la luz para cuatro tipos de fuentes de luz después de una hora de exposición, en una situación típica de alumbrado vial considerando para ello cuatro tipos de fuentes de luz y tres escenarios en relación con las fuentes de luz: Sodio alta presión (2050K); Halogenuros metálicos (4000K); LED blanco frío (5200K) y LED blanco muy frío (6900K) la imagen muestra la potencia espectral de cada fuente a una irradiancia espectral de 95lux.



Realizaron las medidas se supresión de melatonina mediante muestras de saliva, tras la exposición durante 1 hora para tres condiciones:

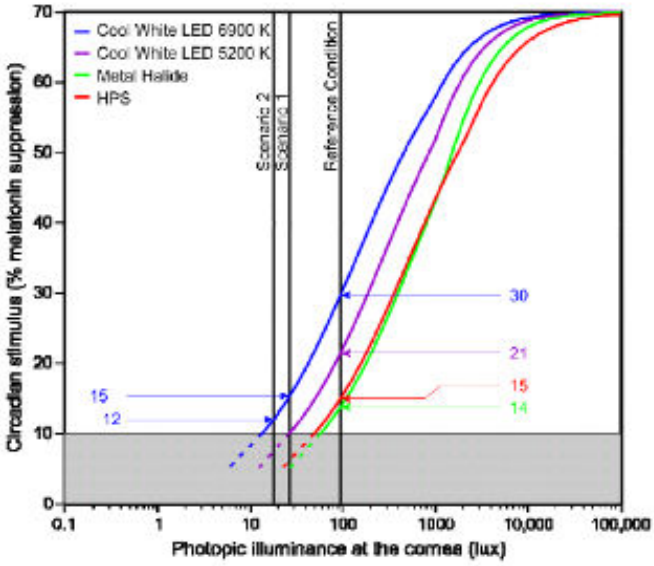
- Referencia: la persona separada 1,5m del poste de la luminaria mira directamente hacia ella, en este caso la iluminancia sobre la córnea es de 95lux
- Escenario 1: la misma persona separada ahora a 3m del poste de la luminaria, mira hacia la calzada, con un nivel de 27lux sobre la córnea.
- Escenario 2: la misma persona separada hora 10m del poste de la luminaria, mira directamente a la luminaria, con un nivel de 18lux



La imagen recoge las tres condiciones, con luminarias montadas a 8,2m de altura, el ojo la persona se considera a 1,5m de altura, la línea verde indica la iluminancia

horizontal y la línea naranja la iluminancia vertical conforme nos vamos separando del poste, marcados en gris los valores de referencia para alumbrado público según IESNA 2000(R2005).

La siguiente imagen recoge los resultados de las medidas de supresión de melatonina (%) en respuesta de la iluminación de las cuatro fuentes de luz para los distintos escenarios. Para el valor de referencia de 95lux las fuentes de luz de 2050K y 4000K tienen un comportamiento prácticamente igual mientras que las luces más frías si incrementa los valores de supresión. Pero en las condiciones de los escenarios 1 y 2, que es donde se encuentran normalmente los valores a los que está sometido un ojo humano al estar bajo un alumbrado público, incluso el LED frio de 5200K no arrojó niveles se supresión de melatonina. La parte sombreada de la imagen corresponde a los valores de incertidumbre asociados el método de medida.

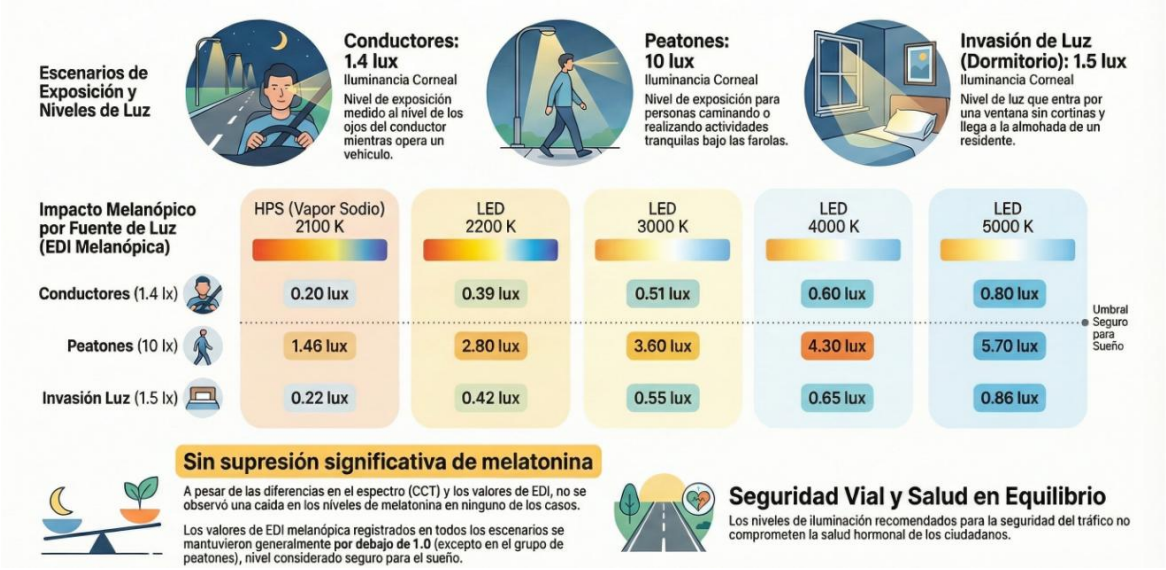


El segundo ejemplo es más reciente en el tiempo y más interesante para lo que estamos detallando en esta ponencia puesto que se analizan LED de diversas temperaturas de color. El artículo ha sido publicado por la revista Cloks and sleeps, titulado “Impacto sobre la melatonina en humanos al iluminar calles con fuentes de luz de estado sólido” realizado por Ronald B Gibbons, Rajaram Bhagavathula, Benjamin Warfield, George C. Brainard y John P. Hanifin.

Fuentes de luz analizadas: HPS de 2100 K y LED blancos de 2200K, 3000K, 4000K y 5000K con un nivel de iluminación medio en el circuito de 1.0 cd/m²
Situaciones de los sujetos: Detalles de los tres grupos de estudio:

- Conductores: Realizaron tareas de conducción y detección visual durante 2 horas
- Peatones: Realizaron actividades sociales y tareas de cruce durante 4 horas
- Invasión de luz (que entra por la ventana en habitación): Sujetos en una habitación simulada orientados hacia la ventana durante 2 horas

Conclusiones principales: Para niveles de 1 cd/m^2 de calzada, tanto para conductores que circulan por esa calle durante 2 horas, peatones que pasean o están parados, realizando actividades sociales, bajo las luminarias durante 4 horas y una persona que duerme en el interior de una habitación a la que le llega luz procedente de las luminarias usadas en alumbrado público, el estudio determinó que en ninguno de los casos, la luz de ninguna de las temperaturas de color incluidas las más frías de 5000K, causó una supresión significativa de la melatonina salival en comparación con la ausencia de luz.



Los valores de EDI melanópico para todos los tipos de fuentes de luz en el caso tanto de los conductores como de las personas en el interior del dormitorio sobre la cama, para todos los tipos de fuentes de luz estuvieron por debajo del umbral que se ha determinado como seguro para dormir, 1 lux EDI. Con lo que era de esperar que no se produjera supresión de la melatonina, pero incluso en los peatones que estaban durante más tiempo y con un nivel de iluminación EDI melanópico superior, el máximo alcanzado peor la fuente de luz de 5000K fue de 5,7lux, no hubo supresión significativa de la melatonina.

3. Necesidades energéticas

Por último, pero no menos importante a la hora de decidir realizar un proyecto de alumbrado vial en un ayuntamiento debemos considerar la gestión energética a lo largo de la vida del proyecto.

Sin duda que el desarrollo de los LED en las últimas décadas proporciona importantes ahorros energéticos y económicos, respecto a las ya eficientes lámparas de sodio baja y alta presión. Con el cambio a tecnología LED podemos reducir enormemente el consumo, pero no con todos los LED del mismo modo.

La tecnología LED actual nos indica que para obtener una temperatura de color más cálida y conseguir el mismo flujo o nivel de iluminación se necesita consumir más

energía. En la actualidad la diferencia entre 4000k, 3000k y 2700k es relativamente pequeña, pero al dar el salto a 2200K o 1800K el consumo se dispara.

En la siguiente tabla recogemos los valores necesarios de potencia para una luminaria en la que manteniendo todos los parámetros exactamente igual lo único que se varía es la fuente de luz en su interior, la diferencia está asociada a la temperatura de color siendo el tipo de LED que se monta idéntico (tan solo se van variando los fósforos para poderlos hacer más cálidos), salvo en el caso de la ClearStar donde el chip que se monta es el mimos que en 3000K pero se añade un filtro ámbar en la óptica para eliminar totalmente la luz azul.

Tc; IRC 70	*Potencia (W) necesaria de la luminaria para mismo nivel de luz*	*Mayor consumo respecto a 4000k*	*Mayor consumo respecto a 3000K*	*Mayor consumo respecto a 2700K*
1800K	*90.37*	*144%*	*137%*	*132%*
CleaStar 1p*	*81*	*129%*	*123%*	*118%*
2200K	*76.18*	*121%*	*115%*	*111%*
2700K	*68.5*	*109%*	*104%*	*100%*
3000K	*66.11*	*105%*	*100%*	
4000K	*62.76*	*100%*		

** en este caso el IRC es de 40*

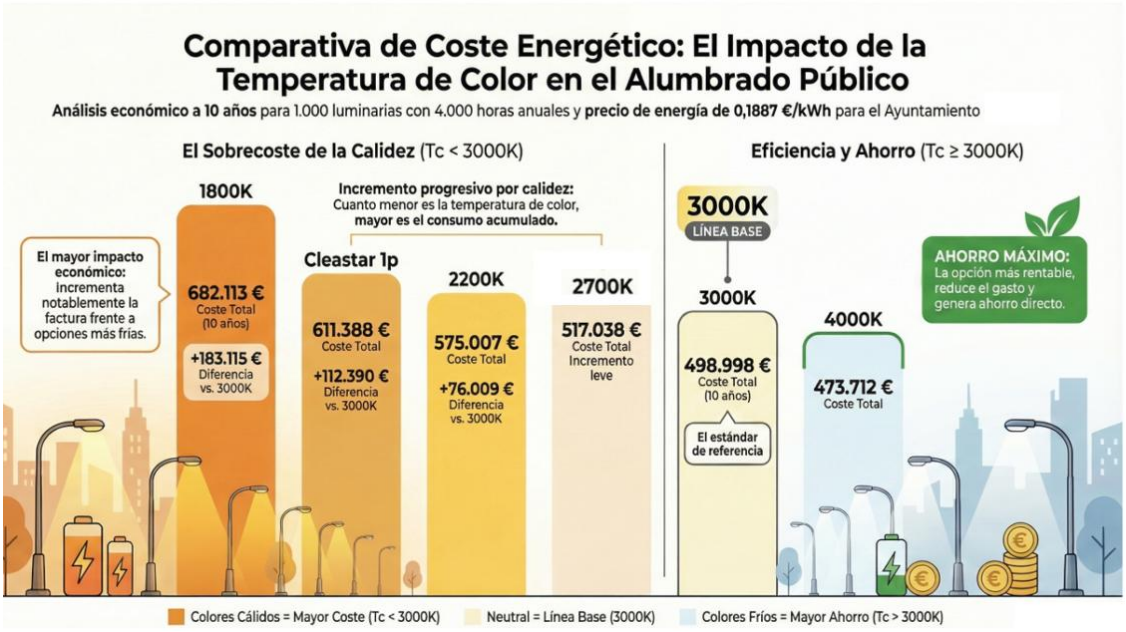
Los datos son claros para conseguir el mismo nivel de iluminación de 1 o 2 cd/m^2 para la temperatura de color de 1800K consumimos un 37% más de energía respecto a una solución de 3000K que a su vez consume un 5% más que la solución de 4000K. Aunque es evidente en los datos numéricos si lo dibujamos en una gráfica se aprecia de modo clarísimo como cambia la tendencia de la pendiente energética al usar LED extremadamente cálidos:



Como consecuencia tendremos un coste económico mucho más elevado, y en absoluto despreciable, si seleccionamos una fuente de luz ultra-cálida para un proyecto de iluminación. Y la pregunta es ¿merece la pena? Teniendo en cuenta que en las ciudades la dispersión de Mie es la más dominante, puesto que es la que ocurre en partículas

grandes (polvo, humo, contaminación, partículas de agua) y puesto que la dispersión de Mie se produce inversamente a la longitud de onda y por tanto casi por igual para los colores, parece que no es proporcionada la perdida energética (de hasta un 44%) y de calidad de luz para las personas por el hecho ir a temperaturas de 1800K o incluso de 2200k frente a fuentes de 2700K, 3000K o 4000K respecto a lo que ganamos sobre la protección de la oscuridad de la noche.

Veamos el impacto económico para un ayuntamiento calculado sobre 1000 luminarias en 10 años de uso y que están encendidas 4000horas al año, si se paga la energía a un precio de 0,1887€/kwh. Tomando como línea base la solución con 3000K



Además del coste energético y económico que conlleva el uso de tecnologías con menor temperatura de color se debe considera también las emisiones de CO_2 que conlleva, siendo esté un tema especialmente importante en el momento actual.

En el ejemplo que estamos analizando estaríamos emitiendo 271.712 toneladas de CO_2 que podríamos haber dejado de emitir al medioambiente por cada 1000 luminarias.

Conclusiones:

Por todo lo visto a lo largo de la ponencia para intentar alcanzar un equilibrio de calidad visual, medioambiental y técnico-económico para cada uno de los proyectos se debería tener en cuenta a la hora de decidir la solución lumínica que mejor se adapta a iluminar una carretera, calle, carril bici, zona peatonal, área de recreo, etc. al menos los siguientes criterios:

- Decidir si es o no necesario iluminar.
- Decidir con qué nivel y porqué, para ello considerar las necesidades visuales en función de la tarea y los niveles definidos en la norma UNE-EN 13201, asegurando la uniformidad de la vía, sin deslumbrar, sin introducir luz intrusa en casas o zonas medioambientalmente protegidas, pero, alcanzando la relación

entorno para ver los objetos/animales/personas en la zona adyacente a la calzada.
Si se necesita iluminar un área de trabajo de en exteriores, se recomienda seguir al UNE-EN 12464-2 iluminación lugares de trabajo en exteriores.

- Tener en cuenta que trabajamos en condiciones de iluminación mesópica.
  En condiciones de visión mesópica para vías de tráfico lento, carril bici o zonas peatonales la temperatura de color >2700k (ratios S/P >1,1) ayuda a detectar objetos/personas en la visión periférica, respecto a fuentes de 2200k o 1800K (ratios S/P< 0,6)

- Que las temperaturas de color <5000k no incrementan la supresión de melatonina para los niveles de iluminación usados en alumbrado público. Para tiempos de 2 o 4 horas bajo la influencia de este tipo de iluminación.

- Considerar no incrementar la cantidad de luz azul emitida para la protección del cielo en la medida de lo posible. Teniendo en cuenta que el esparcimiento de Mie (el más producido en ambientes de ciudades) es inversamente proporcional a la inversa de la longitud de onda, mientras que el Rayleigh es inversamente proporcional a la inversa de la longitud de onda elevada a la cuarta potencia.

- Que la luz en horario nocturno puede afectar a la fauna y flora. No está determinado con claridad como afecta la temperatura de color en las diversas especies.

- Que se puede reducir la cantidad de azul usando temperaturas de color de 3000K y 2700K con pérdidas energéticas de 5% o 9% respectivamente si partimos de 4000k.

- Que el salto a temperaturas de color más cálidas como son 2200K y en especial los 1800K suponen perdidas muy importantes energéticas del 21% y del 44% respectivamente, respecto a 4000K. Consecuencia de la diferencia en consumo y totalmente proporcional a ella, hay una doble consecuencia:
  - Mayores emisiones de CO2
  - Mayores costes económicos en el uso de la instalación de iluminación.