

La luz en la vida de las personas: luz natural, luz artificial y luz circadiana

“A través de la visión recibimos cerca del 80% de la información que nos llega del entorno, lo que convierte a la luz en un elemento prioritario para la actividad humana, la comunicación y la interacción con el mundo que nos rodea.”

Justiniano Aporta, Elvira Orduna-Hospital y Ana Sánchez-Cano



pixabay

En el año 2015 se celebró, con gran éxito, el **Año Internacional de la Luz y las Tecnologías basadas en la Luz**, una iniciativa que dio lugar a numerosas y variadas actividades a escala internacional. Estas acciones permitieron acercar a la sociedad el papel fundamental que la luz y las tecnologías asociadas desempeñan en el bienestar de las personas, el desarrollo tecnológico y el avance de la ciencia.

Como continuación de esta iniciativa, la UNESCO proclamó el 16 de mayo como Día Internacional de la Luz (DIL), que se celebra anualmente desde 2018. Esta fecha conmemora la primera emisión de luz láser, lograda el 16 de mayo de 1960 por Theodore Maiman mediante un láser de rubí, un hito científico que marcó el inicio de innumerables aplicaciones tecnológicas.

En este contexto, el Comité Español del DIL ha designado a Zaragoza como sede de la celebración central en España en el año 2026, coordinando principalmente desde la Universidad de Zaragoza un amplio programa de actividades divulgativas, educativas y culturales.

Con este motivo, aprovechamos la revista de la Facultad de Ciencias, *ConCiencias*, para divulgar la importancia que la luz ha tenido y sigue teniendo en la vida cotidiana de las personas, así como su impacto transversal en campos tan diversos como la ciencia, la tecnología, la salud, la cultura y la sostenibilidad.

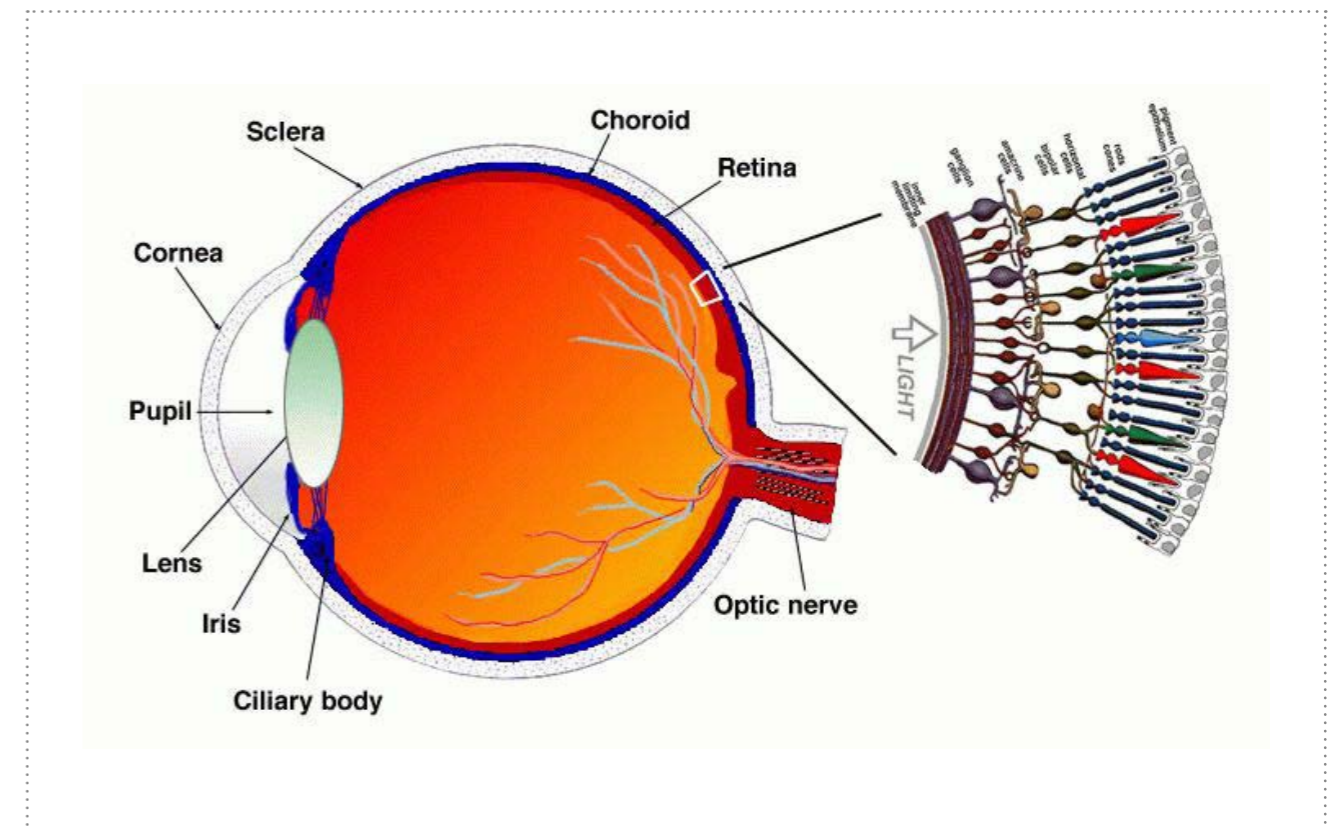
Sin la luz, la vida en la Tierra nunca habría existido. La radiación procedente del Sol fue el catalizador imprescindible para que surgieran los primeros procesos biológicos en nuestro planeta y continúa siendo, hoy en día, la base energética que sostiene los ecosistemas.

Si la luz se extinguiera repentinamente, la vida desaparecería también en un breve espacio de tiempo. Por ello, la luz es tan esencial para la existencia como el agua, el aire o la propia Tierra.

Además de su papel fundamental en los procesos vitales, la luz es la herramienta de trabajo básica del sentido de la vista. A través de la visión recibimos cerca del 80 % de la información que nos llega del entorno, lo que convierte a la luz en un elemento prioritario para la actividad humana, la comunicación y la interacción con el mundo que nos rodea.

Durante mucho tiempo se consideró que la luz que llegaba al ojo humano era detectada exclusivamente por las células fotosensibles de la retina (conos y bastones), donde se iniciaba el proceso visual, y que su función principal era únicamente permitir la visión (Figura 1). Esta luz procedía casi en exclusiva de fuentes naturales, fundamentalmente del Sol y de la bóveda celeste.

Figura 1. Estructura de la retina, donde se distinguen las diferentes clases de células fotosensibles: conos y bastones. Los conos son responsables de la visión fotópica, cromática y de alta agudeza visual, mientras que los bastones participan principalmente en la visión escotópica, en condiciones de baja iluminación.



Durante miles de años, los seres humanos vivieron bajo la influencia exclusiva de esta **luz natural**. A lo largo de ese tiempo, la evolución del cerebro, la fisiología y la psicología humanas, así como las actividades cotidianas, estuvieron estrechamente ligadas a los ciclos naturales del día y la noche.

El primer contacto del ser humano con la **luz artificial** se produjo con el descubrimiento del fuego, hace aproximadamente 200.000 años, aunque su dominio fue lento y progresivo. Se estima que el uso de antorchas comenzó hace unos 10.000 años, las lámparas de aceite hace alrededor de 2.000 años, las velas hace unos 400 años y las primeras lámparas de gas en 1807, hace poco más de dos siglos.

Cada uno de estos avances en el control de la luz artificial fue transformando gradualmente los hábitos de vida de las personas, ampliando el tiempo de actividad, modificando los espacios habitados y sentando las bases de la sociedad moderna.

Sin embargo, todo cambió a finales del siglo XIX con la aparición de uno de los grandes hitos tecnológicos de la historia: la bombilla eléctrica.

En 1880, Thomas Edison presentó el primer modelo comercial viable de lámpara incandescente, marcando el inicio de la era de la iluminación eléctrica. Su rápida implantación, sin precedentes hasta ese momento, fue posible gracias al desarrollo y la generalización de la corriente alterna, impulsada por Nikola Tesla, uno de los pilares fundamentales de la segunda Revolución Industrial. Apenas un siglo después, más del 70 % de la población mundial disponía de acceso a la luz eléctrica, porcentaje que alcanzó aproximadamente el 90 % en 2016.

A partir de ese momento, la arquitectura de los espacios productivos comenzó a transformarse profundamente. Las nuevas posibilidades de acondicionamiento térmico (calefacción y aire acondicionado) favorecieron la construcción de edificios cada vez más cerrados, en los que el contacto con el exterior y con la luz natural fue disminuyendo progresivamente, tanto en entornos laborales como residenciales.

El continuo desarrollo tecnológico y la implantación gradual de una sociedad 24/7 han hecho que las personas pasen, y sigan pasando, una parte muy significativa de su tiempo bajo iluminación artificial, tanto durante el día como, de forma evidente, durante la noche.

A lo largo del siglo XX se produjo un notable avance en los tipos de lámparas y luminarias, así como en el conocimiento del funcionamiento del ojo humano y de su relación con la luz y la iluminación. Se constató que una iluminación adecuada tiene una incidencia directa

Figura 2. Comparación de condiciones de iluminación: izquierda, luz natural al amanecer; centro, iluminación solar diurna; derecha, iluminación artificial nocturna en entorno laboral con pantalla, asociada a variaciones en desempeño visual y respuestas psicofisiológicas.

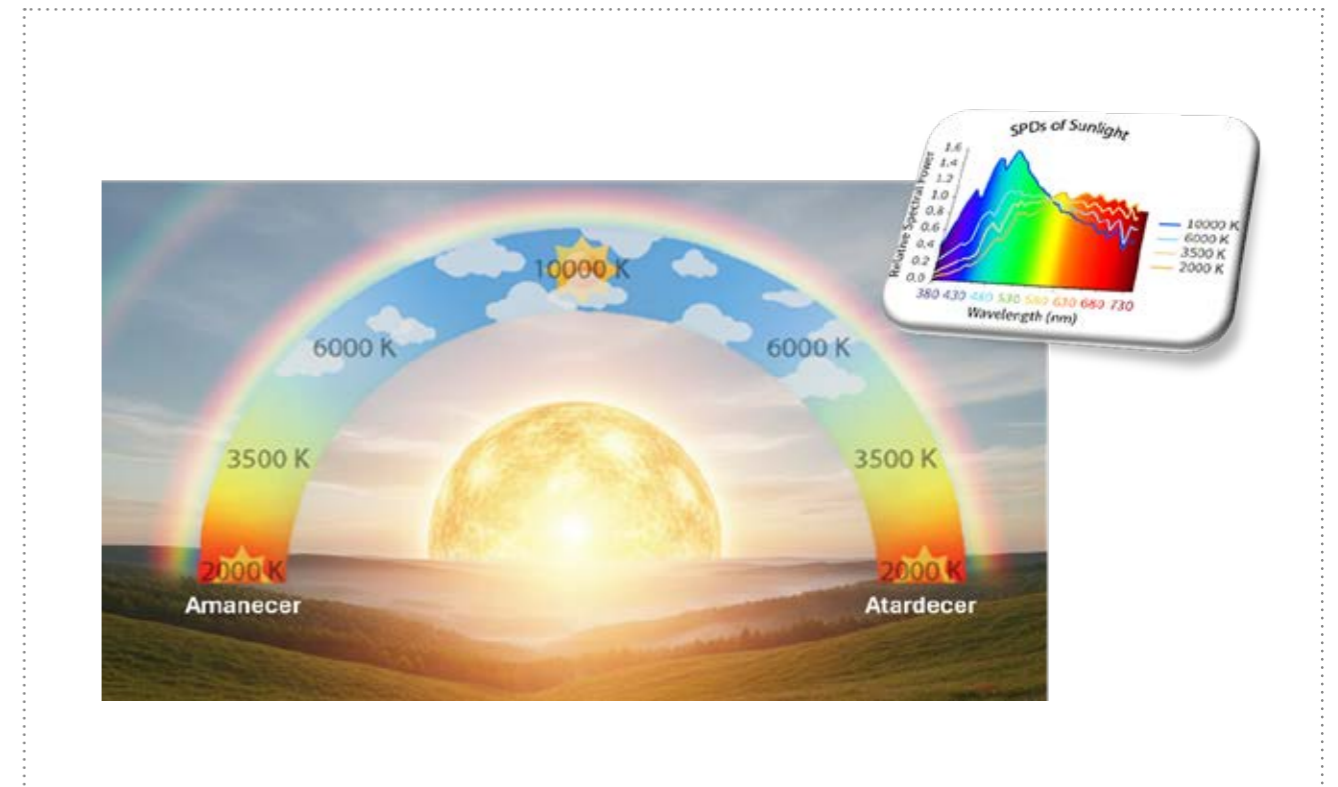
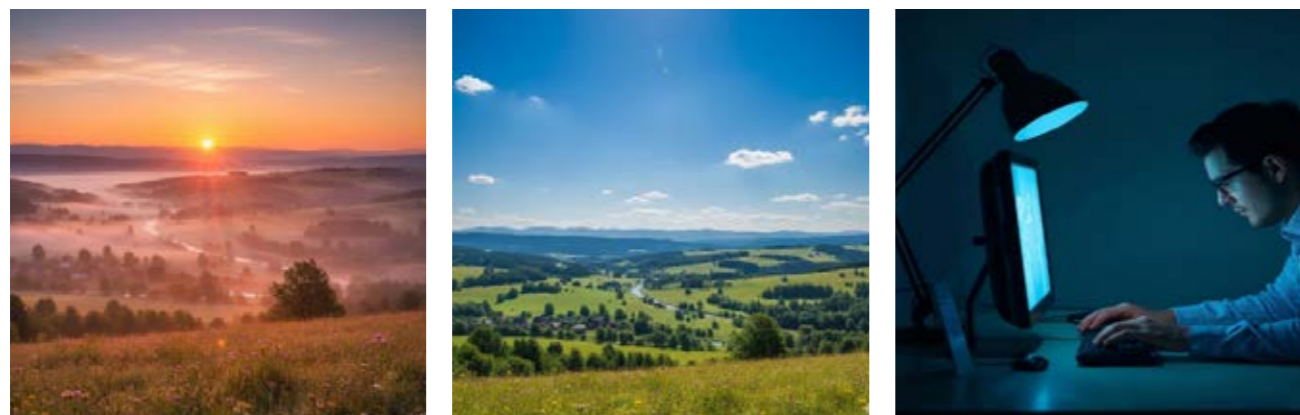


Figura 3. Espectro relativo de la luz diurna a lo largo del día. Se muestran las variaciones espectrales desde las primeras horas de la mañana hasta el atardecer, reflejando los cambios en la composición espectral de la luz solar que influyen en la percepción visual y en la sincronización de los ritmos circadianos.

en el rendimiento laboral, mejorando la rapidez de ejecución, reduciendo el índice de errores e incrementando la seguridad. Sin embargo, también comenzaron a observarse, en un porcentaje creciente de la población, diversos trastornos de carácter psicofisiológico, inicialmente difíciles de explicar, asociados a estas condiciones de iluminación: fatiga visual, sequedad ocular, cefaleas, alteraciones del sueño, falta de atención y desajustes del sistema hormonal, con impacto negativo en el estado de ánimo, la productividad, el bienestar y la salud general (Figura 2).

Poco a poco comenzó a plantearse que estos efectos podrían tener su origen en la progresiva desconexión de las personas con el entorno natural, con los ciclos de luz y oscuridad del día y la noche, así como en las profundas diferencias existentes entre la luz natural y la luz artificial.

Por un lado, se tiene el espectro de la luz natural, continuo y dinámico, variando a lo largo del día en intensidad, direccionalidad y temperatura de color, así como con las estaciones del año y la latitud geográfica (Figura 3).

En contraste se tienen las curvas espectrales de diferentes fuentes de luz artificial, caracterizadas por ser

“Durante miles de años, los seres humanos vivieron bajo la influencia exclusiva de esta luz natural.”



Figura 4. Ejemplos de diferentes fuentes de luz artificial y sus correspondientes espectros de emisión. Cada fuente presenta una distribución espectral característica que determina su eficiencia visual, su reproducción cromática y su impacto potencial sobre los ritmos circadianos.

discontinuas y, en general, constantes en el tiempo, al menos en lo que respecta a su temperatura de color y direccionalidad (Figura 4).

No fue hasta comienzos del siglo XXI cuando se empezaron a comprender con mayor precisión los efectos potencialmente nocivos que la luz artificial puede producir en las personas, así como los mecanismos fisiológicos que los explican.

A principios de este siglo se descubrió en la retina un nuevo tipo de células ganglionares intrínsecamente fotosensibles (*intrinsically photosensitive Retinal Ganglion Cells*, ipRGCs), que se suman a los ya conocidos conos y bastones, responsables de la percepción visual de las imágenes (Figura 5).

Los resultados de las numerosas investigaciones realizadas desde entonces han permitido confirmar la existencia de dos vías diferentes de procesamiento de la luz que llega al ojo. Por un lado, la vía formadora de imagen, también denominada ruta óptica, que se inicia en los conos y bastones y permite la visión. Por otro, la vía no formadora de imagen (NIF), basada en las ipRGCs, que regula funciones biológicas esenciales como los ritmos circadianos, la secreción hormonal y el estado de alerta.

Estas nuevas células contienen un fotopigmento denominado melanopsina (Figura 6), sensible a la radiación luminosa, cuyo pico máximo de respuesta espectral

“A lo largo del siglo XX se produjo un notable avance en los tipos de lámparas y luminarias, así como en el conocimiento del funcionamiento del ojo humano.”

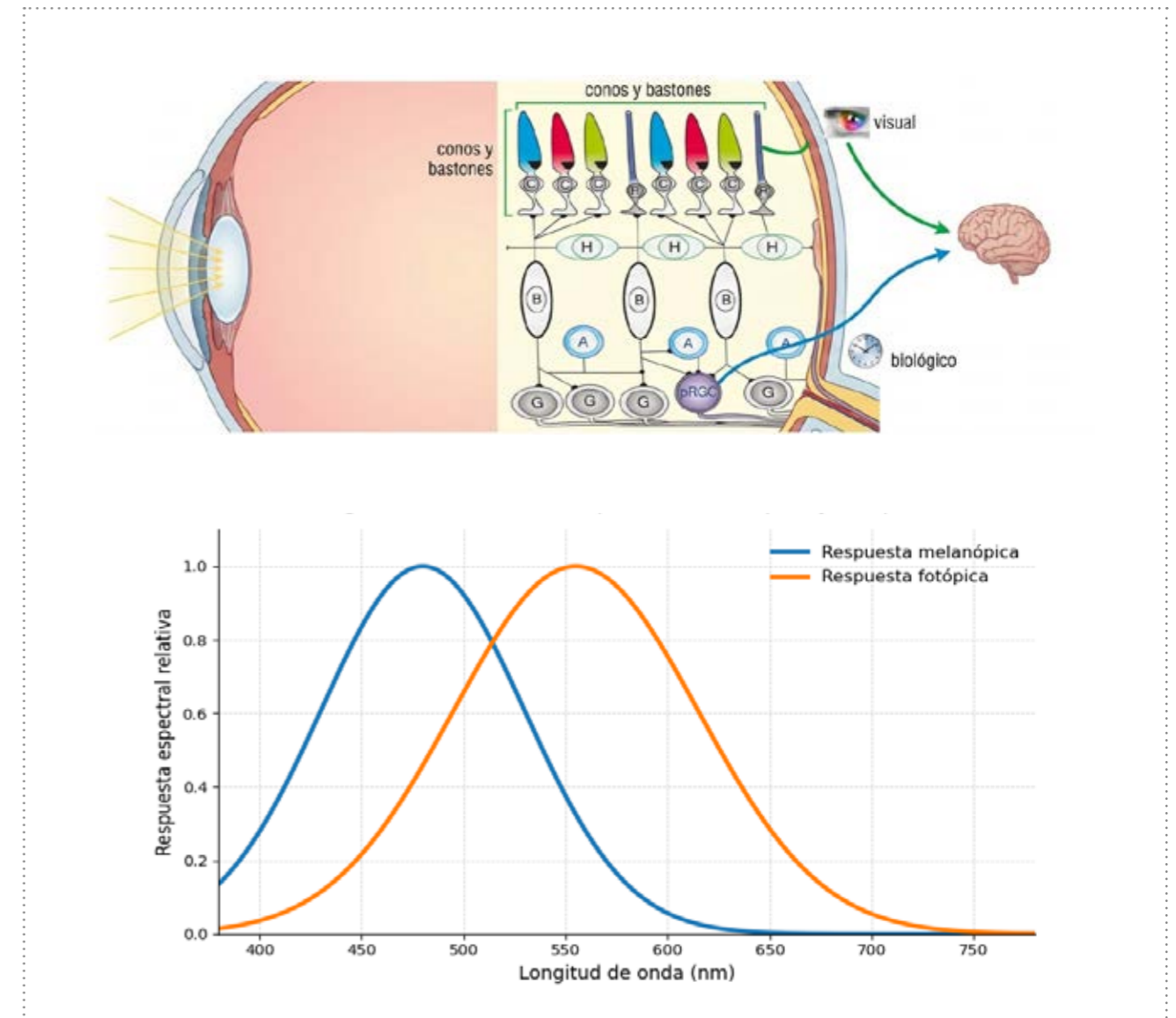


Figura 5 (arriba). Representación esquemática de los diferentes tipos de células fotosensibles presentes en la retina: conos, bastones y células ganglionares intrínsecamente fotosensibles (ipRGCs). Estas últimas contienen melanopsina y desempeñan un papel clave en la regulación de los ritmos circadianos y otras respuestas no visuales a la luz.

está desplazado hacia longitudes de onda más bajas que la correspondiente a los conos, responsables de la visión fotópica. Esta diferencia explica que la luz pueda producir efectos muy distintos en el organismo en función de su intensidad, de su composición espectral y del tiempo de uso.

Los niveles de radiación asociada a la luz fotópica, relacionada con la percepción visual se cuantifican en luxes sobre el plano de trabajo (iluminancia horizontal) y deben ajustarse a los valores establecidos por las normativas de iluminación, tanto en espacios interiores como exteriores.

Por el contrario, la radiación asociada a la curva melanópica, vinculada a los efectos no visuales de la luz, debe

Figura 6 (abajo). Curvas de respuesta espectral relativa melanópica (azul) y fotópica (rojo). La sensibilidad melanópica, asociada a las células ganglionares intrínsecamente fotosensibles de la retina, muestra un máximo en longitudes de onda cortas y está directamente relacionada con la regulación de los ritmos circadianos, mientras que la respuesta fotópica se asocia a la visión mediada por conos.

medirse sobre el plano de entrada del ojo (iluminancia vertical) y debe basarse en los resultados de los estudios relacionados con la segunda ruta de la luz, la NIF, también en interiores y exteriores.

Las células ipRGCs envían señales directamente al hipotálamo, concretamente al núcleo supraquiasmático (NSQ), a través del tracto retinohipotalámico, desencadenando diversas respuestas de carácter fisiológico.

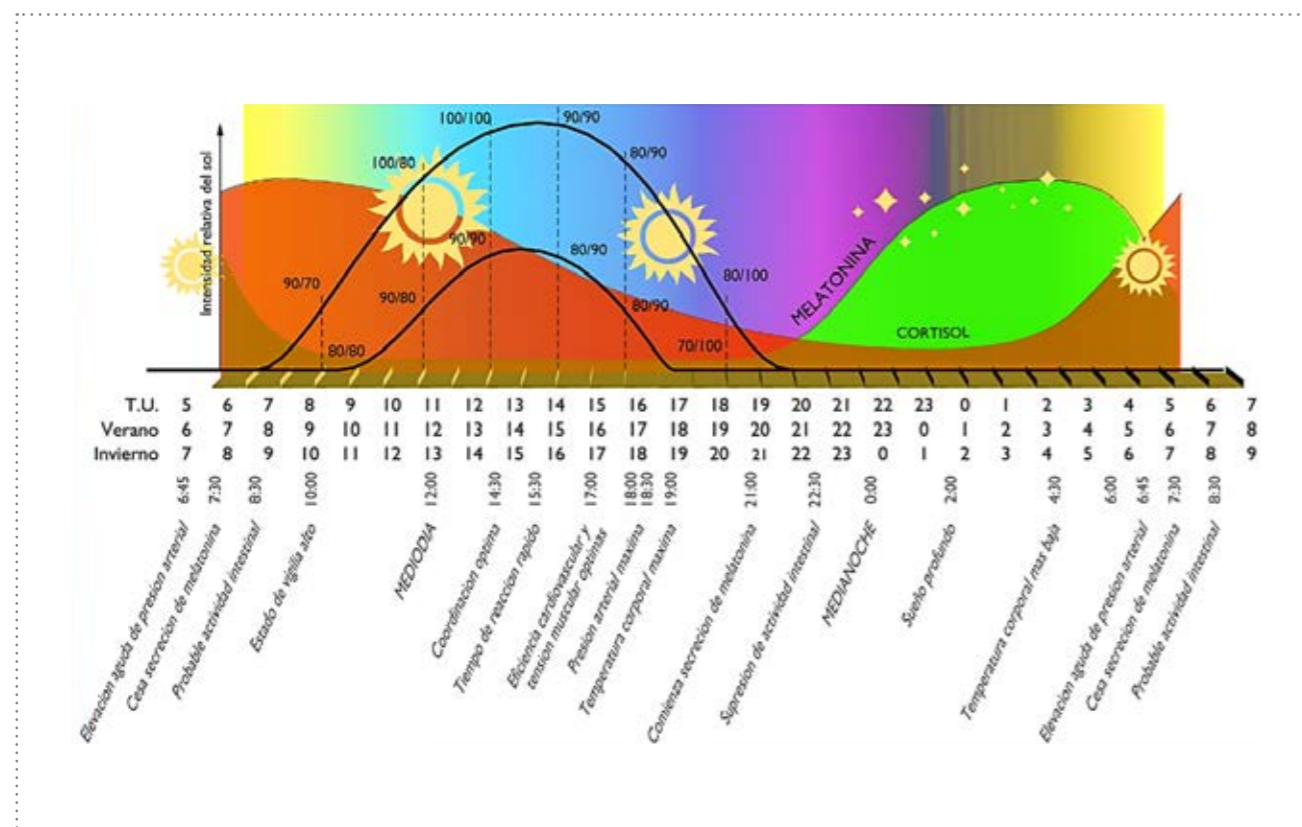
Por una parte, estas señales permiten la orientación temporal, ajustando nuestro reloj biológico interno a un ciclo de aproximadamente 24 horas mediante la alterancia natural de luz y oscuridad. En ausencia de esta referencia luminosa, el reloj biológico funciona de manera autónoma, con un periodo cercano a 25 horas, según coinciden numerosos estudios.

Por otra parte, la luz influye de manera decisiva en la producción y regulación hormonal, actuando sobre glándulas clave del sistema endocrino, entre las que destacan la epífisis o glándula pineal y la hipófisis o glándula pituitaria. Junto con el hipotálamo, estas estructuras forman un sistema de control fundamental para el equilibrio fisiológico y el bienestar general del organismo.

La glándula pineal, mediante la secreción de melatonina al torrente sanguíneo, regula múltiples biorritmos, entre ellos los ritmos circadianos, informando al resto de las células del organismo de si es de día o de noche. La producción de melatonina está fuertemente modulada por la luz, siendo mucho mayor en ausencia de ella, es decir, en la oscuridad, motivo por el cual se la conoce comúnmente como la hormona del sueño.

Entre las hormonas cuya secreción se ve modulada, directa o indirectamente, por la luz se encuentran las siguientes:

Figura 7. Comparación de las evoluciones relativas de distintos tipos de hormonas a lo largo de las diferentes horas del día y de las estaciones del año. Las variaciones hormonales reflejan la influencia de los ritmos circadianos y estacionales sobre procesos fisiológicos clave, modulados principalmente por el ciclo luz-oscuridad y los cambios en la duración del fotoperiodo.



pixabay

- Melatonina: induce la sensación de cansancio, ralentiza diversas funciones fisiológicas y reduce el nivel de actividad del organismo, favoreciendo el descanso y el sueño. Su producción aumenta en condiciones de oscuridad y disminuye con la exposición a la luz.
- Cortisol: conocida como la hormona del estrés, comienza a aumentar de forma natural en las primeras horas de la madrugada, alcanzando su máximo por la mañana y disminuyendo progresivamente a lo largo del día. Estimula el metabolismo y prepara al organismo para la actividad diurna.
- Serotonina: actúa como estimulante y modulador del estado de ánimo, contribuyendo a elevar los niveles de energía y motivación. Precursora de la melatonina, desempeña un papel relevante en la regulación del sueño, la temperatura corporal, la digestión y diversos aspectos del bienestar emocional y social.
- Dopamina: interviene en la coordinación muscular, el estado de alerta, los mecanismos de recompensa y placer, así como en procesos cognitivos. Estudios recientes sugieren también su implicación en el control del crecimiento ocular y el desarrollo de la miopía.
- Grelina: conocida como la hormona del hambre, estimula el apetito y participa en la regulación de la saciedad. Además, interviene en el control del peso corporal, el metabolismo de la glucosa, la secreción de insulina, la función cardiovascular y el metabolismo óseo.

- Leptina: desempeña un papel clave en el control del apetito y del gasto energético. Asimismo, modula la respuesta inmunitaria e influye en el desarrollo y funcionamiento del sistema nervioso, así como en la función reproductiva.

En la Figura 7 se muestran las evoluciones relativas típicas de algunos de estos parámetros a lo largo de un ciclo diario. Las superficies representadas corresponden a la producción de melatonina y cortisol, mientras que las dos curvas negras de trazo continuo indican la iluminancia relativa de la luz natural en los dos solsticios del año en la ciudad de Zaragoza.

La comparación entre estas variables pone de manifiesto la estrecha relación existente entre la exposición a la luz natural y la regulación de los ritmos biológicos. En particular, evidencia el papel fundamental que desempeña la ruta NIF en el bienestar, la salud y el equilibrio fisiológico de las personas.

Este conocimiento obliga a replantear el diseño de los sistemas de iluminación, incorporando los efectos no visuales de la luz y considerándolos a un nivel de importancia comparable al de la iluminación destinada a la visión. Sin embargo, estos aspectos han sido tradicionalmente poco tenidos en cuenta en los proyectos de iluminación convencionales.

Las investigaciones desarrolladas en torno a esta segunda vía han permitido comprender mejor la forma

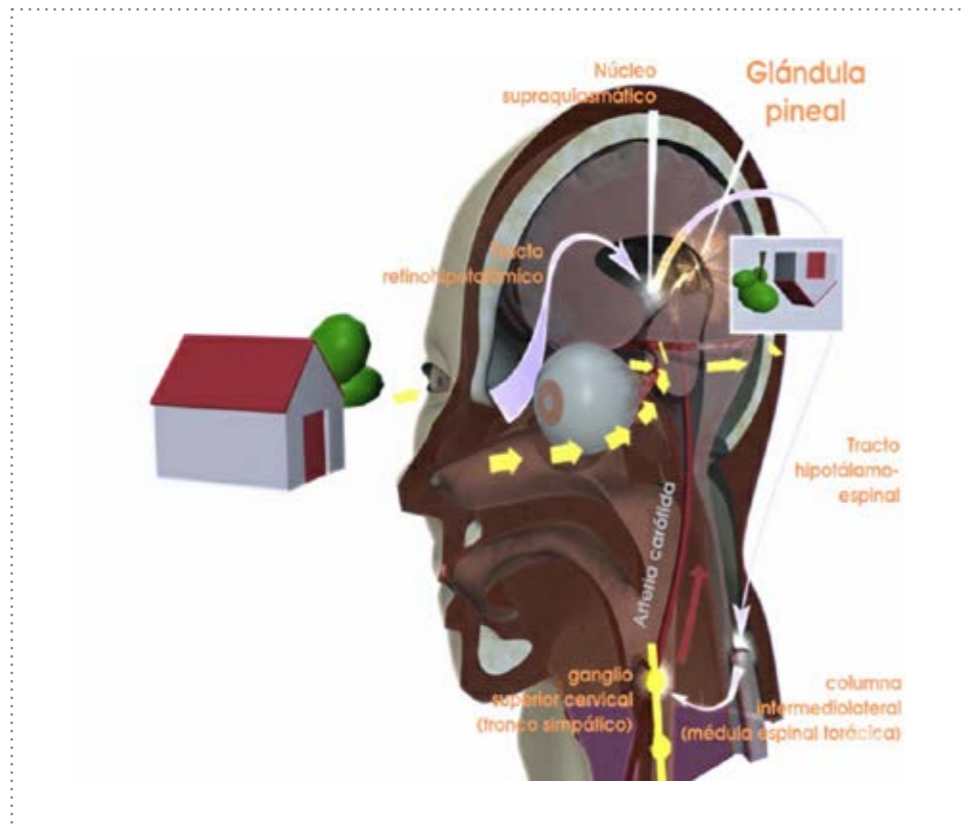


Figura 8. Vía neuroanatómica de la regulación circadiana por la luz. La información luminosa captada por la retina se transmite al núcleo supraquiasmático del hipotálamo a través del tracto retinohipotalámico. Desde allí, la señal se propaga por vías hipotalámicas y simpáticas hacia la glándula pineal, modulando la secreción de melatonina y sincronizando los ritmos circadianos con el ciclo luz-oscuridad.

en que nuestro organismo se relaciona con el entorno y han puesto de relieve el papel esencial que la luz desempeña en múltiples procesos biológicos, más allá de su función puramente visual.

La luz puede incidir sobre cualquier parte del cuerpo humano expuesta al ambiente y, de manera especialmente relevante, sobre la retina a través de los ojos. La luz que accede por esta vía, denominada luz ocular, activa dos rutas claramente diferenciadas de entrada de información, tal como se muestra esquemáticamente en la Figura 8.

Gracias a los avances científicos de las últimas décadas, hoy sabemos que la luz que llega a nuestros ojos no sirve únicamente para ver. La luz puede contribuir de forma decisiva a nuestro bienestar, aumentando la sensación de confort, mejorando el funcionamiento del organismo, reduciendo el riesgo de determinadas patologías y haciendo más agradables y productivas las actividades diarias.

La exposición luminosa influye directamente en el estado de alerta, pudiendo incrementar la concentración y reducir la fatiga, así como en el rendimiento cognitivo, las emociones y la correcta regulación del ciclo sueño-vigilia.

Para que estos efectos positivos se produzcan, la luz debe ser la adecuada, es decir, lo más parecida posible a la luz natural, que ha sido el principal regulador de nuestra biología a lo largo de la evolución. A este tipo de iluminación, capaz de sincronizar nuestros ritmos biológicos, la denominamos **luz circadiana**.

Tal y como se ha señalado anteriormente, en el primer cuarto del siglo XXI se han desarrollado numerosos estudios sobre los efectos endocrinos de la luz y su impacto en la salud, analizando su relación con la aparición de trastornos como la depresión, determinadas enfermedades cardiovasculares e incluso algunos tipos de cáncer.

“En la actualidad, nadie cuestiona las múltiples ventajas de una adecuada iluminación natural.”

En la actualidad, nadie cuestiona las múltiples ventajas de una adecuada iluminación natural, más allá del evidente ahorro energético que puede conllevar. Por ello, un buen diseño debe saber integrarla y gestionarla desde las primeras fases del proyecto, colaborando con la arquitectura en la adopción de soluciones espaciales y constructivas favorables, y considerándola de forma explícita en el propio proyecto de iluminación para maximizar sus beneficios.

No obstante, dado que la luz natural no siempre puede utilizarse como fuente principal, la investigación se ha orientado también hacia la optimización de la iluminación artificial, con el objetivo de reproducir, en la medida de lo posible, los efectos beneficiosos de la luz natural. Aunque no es viable imitar sus elevados niveles de iluminancia por razones técnicas y económicas, sí es posible actuar sobre otros parámetros clave, como la distribución espectral y las variaciones temporales de la intensidad, que caracterizan a la luz natural dinámica.

Numerosos estudios han puesto de manifiesto la estrecha relación entre la exposición a la luz y la estabilidad emocional. Alteraciones en este equilibrio se asocian a trastornos como la depresión y la ansiedad, en los que se observa una disrupción de los ritmos biológicos. En particular, en la denominada depresión estacional se han descrito disfunciones en el funcionamiento del hipotálamo que pueden revertirse, al menos parcialmente, mediante tratamientos con luz brillante, capaces de incrementar los niveles de serotonina en el cerebro. Exposiciones breves a iluminancias elevadas, especialmente al despertar o en las primeras horas de la mañana, han demostrado ser eficaces para restaurar el equilibrio hormonal y mejorar el estado general.

Cuando las condiciones de iluminación se alejan de la distribución espectral de la luz natural, se ha observado un aumento en la secreción de corticotrofina (ACTH) por parte de la hipófisis, lo que puede generar una mayor activación del eje del estrés. Este efecto parece ser más acusado bajo iluminación artificial inadecuada y podría mitigarse mediante el uso de fuentes de luz con un espectro más completo, similares al natural. Además, este tipo de iluminación favorece la producción de dopamina, con efectos positivos sobre el estado de alerta y, según estudios recientes, sobre el control del crecimiento ocular y la miopía.

La capacidad de la luz para desplazar o reajustar la fase del reloj biológico ha abierto también nuevas posibilidades de aplicación práctica. Entre ellas destacan la reducción de los efectos del *jet lag* en viajes transmeridianos, la mejora de la adaptación a los turnos de trabajo nocturno y la recreación de ciclos de luz y oscuridad en espacios cerrados o en latitudes con escasa variación estacional. Una gestión adecuada del fotoperiodo permite mantener el estado de alerta, mejorar el rendimiento y reducir de forma significativa los errores y la siniestralidad laboral.

Otro aspecto relevante es que la percepción de confort lumínico depende tanto de la actividad realizada como de las características individuales. Por ello, se ha demostrado la utilidad de sistemas de iluminación regulables en el puesto de trabajo, que permitan a cada persona ajustar niveles e incluso tonalidades de la luz según sus necesidades.

Este enfoque integral da lugar a los denominados proyectos de iluminación centrada en la persona (*Human*



Centric Lighting, HCL), cuyo objetivo es equilibrar los beneficios visuales, biológicos y emocionales de la luz, en forma de **luz integradora**. En este contexto, se distinguen tres componentes complementarios:

- **Luz funcional**, destinada a garantizar unas condiciones visuales óptimas para cada tarea, de acuerdo con las normativas vigentes.
- **Luz biológica o circadiana**, diseñada de forma dinámica para apoyar los ritmos biológicos, modulando intensidad, espectro y duración a lo largo del día.
- **Luz emocional**, relacionada con aspectos estéticos, psicológicos y arquitectónicos, que contribuyen a generar sensaciones de confort, bienestar y seguridad.

El estado actual de la tecnología permite iluminar espacios interiores con luz artificial que, en cada momento del día y en cualquier época del año, reproduce muchas de las características de la luz natural. Esta iluminación no solo cumple los requisitos funcionales para la visión, sino que también responde a las necesidades biológicas y emocionales de las personas.

Figura 9. Ejemplo de espacio de trabajo con diferentes temperaturas de color de iluminación circadiana, simuladas exclusivamente mediante luz artificial, en distintas horas del día. La variación en la temperatura de color reproduce los cambios naturales del ciclo luz-oscuridad, favoreciendo la sincronización de los ritmos circadianos y el confort visual.



Los entornos donde la iluminación HCL aporta un mayor valor añadido son aquellos de ocupación prolongada, como hospitales, residencias de mayores, oficinas, centros educativos, bibliotecas, hoteles y, de manera muy significativa, los hogares, donde se inicia y finaliza la actividad diaria.

Aunque de forma general se habla de iluminación "circadiana" cuando se varían intensidad y temperatura de color, los proyectos HCL no replican de manera estricta el ciclo natural del día, sino que lo adaptan a las funciones, turnos, estaciones y latitudes, buscando minimizar la disrupción de los ritmos biológicos y mantener el nivel de alerta necesario.

En este ámbito, la **luz melanópica** se ha convertido en un parámetro clave. Aunque aún no existe un marco científico completamente cerrado sobre los niveles óptimos de exposición, sí se han alcanzado consensos relevantes. La Comisión Internacional de Iluminación (CIE) recomienda el uso de la métrica de iluminancia melanópica equivalente a luz día (mEDI), con valores orientativos mínimos de activación diurna y máximos nocturnos para evitar la inhibición de la melatonina. Estas recomendaciones ofrecen ya una base sólida para guiar el diseño de proyectos de iluminación centrados en la salud, el bienestar y el rendimiento humano.

Tal y como han puesto de manifiesto numerosas investigaciones de campo realizadas en el primer cuarto del siglo XXI, la iluminación integradora o HCL aporta un conjunto de beneficios contrastados, cuya relevancia puede variar en función del tipo de espacio y de la actividad desarrollada. Entre los principales valores añadidos destacan:

- Sincronización del sistema circadiano, con una mejora significativa de la calidad del sueño, lo que repercute positivamente en el sistema inmunitario,



Figura 10. Premio Nobel de Fisiología o Medicina 2017 otorgado conjuntamente a Jeffrey C. Hall, Michael Rosbash y Michael W. Young por sus descubrimientos de los mecanismos moleculares que controlan el ritmo circadiano. Sus hallazgos demostraron cómo los relojes biológicos regulan la secreción hormonal a lo largo del día y establecieron que la luz es el principal condicionante externo de los ritmos circadianos.

la memoria y el comportamiento.

- Mejora de las capacidades visuales y cognitivas, favoreciendo la atención y el procesamiento de la información, y con evidencias crecientes de su contribución al control del desarrollo de la miopía.
- Optimización del estado de alerta y la concentración a lo largo del día, facilitando el aprendizaje, incrementando el rendimiento y la productividad, y reduciendo errores y fallos en la ejecución de tareas.
- Reducción del estrés y mejora del estado anímico, disminuyendo la necesidad de medicación asociada al tratamiento del insomnio, los trastornos del ánimo y el estrés.
- Mejor adaptación a los turnos de trabajo nocturno y a los cambios de turno, minimizando la disrupción de los ritmos biológicos.
- Disminución de los tiempos de recuperación en un alto porcentaje de pacientes, especialmente en entornos hospitalarios y sociosanitarios.
- Aumento de la seguridad y reducción de la siniestralidad laboral, asociado a una mayor atención y a una menor fatiga.
- Mejora de la percepción de los entornos de trabajo, contribuyendo a un clima laboral más positivo y a una reducción del absentismo.
- Reducción de molestias físicas frecuentes, como dolores de cabeza, fatiga visual e irritaciones oculares, así como de diversos trastornos relacionados con los efectos endocrinos de una iluminación inadecuada.

En conjunto, estos resultados refuerzan la idea de que una iluminación correctamente diseñada no solo permite ver mejor, sino que constituye una herramienta clave para

la salud, el bienestar y el desempeño humano, y debe ser considerada como un elemento esencial en el diseño de los espacios que habitamos y utilizamos a diario.

Justiniano Aporta, Elvira Orduna-Hospital y Ana Sánchez-Cano
Dpto. de Física Aplicada
Facultad de Ciencias
Universidad de Zaragoza