

**FACULTAD DE CIENCIAS
GRADO EN ÓPTICA Y OPTOMETRÍA
TRABAJO FIN DE GRADO
CURSO ACADÉMICO [2022-2023]**

TÍTULO:

FILTROS AZULES PARA DISPOSITIVOS OPTOELECTRÓNICOS.

AUTOR:

ISABEL GONZÁLEZ MARTÍNEZ.

TUTOR:

PEDRO JOSÉ BOJ GIMENEZ.

ANA TOBARRA LÓPEZ.

Resumen

Los ritmos circadianos están regulados por la melatonina, hormona secretada por la glándula pineal sensible a longitudes de onda cortas. Se ha descubierto que la radiación azul emitida por los dispositivos optoelectrónicos provoca una disminución de los niveles de melatonina y, en consecuencia, problemas a la hora de conciliar el sueño. El consumo de lentes oftálmicas con filtro para la luz azul ha aumentado en las últimas décadas. Numerosos son los defensores de dichas lentes que sugieren beneficios como reducción de la fatiga visual o la mejora del sueño.

En este estudio, vamos a evaluar la eficacia de filtros digitales y filtros ópticos-analógicos para distintos dispositivos optoelectrónicos analizando como actúa cada uno de ellos sobre la radiación azul emitida por estos dispositivos. De esta manera, podremos establecer si las lentes oftálmicas que hay en el mercado actualmente son verdaderamente efectivas. Además, analizaremos la influencia de la radiación azul y de los filtros con relación a la supresión de melatonina, determinando el impacto que tienen sobre nuestra salud.

Abstract

The circadian rhythms are regulated by melatonin, a hormone secreted by the pineal gland sensitive to short wavelengths. Blue radiation emitted by optoelectronic devices has been found to cause decreased melatonin levels and consequently problems with falling asleep. The consumption of ophthalmic lenses with a blue light filter has increased in recent decades. There are many defenders of these lenses who suggest benefits such as reduced eyestrain or improved sleep.

In this study, we are going to evaluate the efficiency of digital filters and optical-analogical filters for different optoelectronic devices, analyzing how each of them acts on the blue radiation emitted by these devices. In this way, we will be able to establish if the ophthalmic lenses are truly effective. Furthermore, we will analyze the influence of blue radiation and filters in relation to the suppression of melatonin, determining the impact they have on our health.

ÍNDICE.

| | |
|---|----|
| 1. Introducción..... | 4 |
| 2. Objetivos..... | 7 |
| 3. Radiación emitida por los dispositivos optoelectrónicos: parámetros fotofísicos... | 8 |
| 4. Características técnicas de los dispositivos y de las gafas analizadas..... | 13 |
| 5. Métodos experimentales..... | 16 |
| 5.1. Magnitudes físicas..... | 16 |
| 5.2. Técnicas experimentales..... | 16 |
| - Instrumentos de medida..... | 16 |
| - Montaje experimental..... | 18 |
| 5.3. Medidas experimentales..... | 19 |
| 6. Resultados..... | 21 |
| 7. Análisis y discusión..... | 35 |
| 8. Conclusión..... | 47 |
| 9. Bibliografía..... | 48 |

1- INTRODUCCIÓN

Los ritmos circadianos regulan los principales sistemas fisiológicos de los seres humanos. Estos ritmos están regulados por un reloj interno que se encuentra en el núcleo supraquiasmático (SCN) del hipotálamo anterior, y por otros relojes periféricos que se han identificado en numerosos tejidos, como el hígado o el riñón, entre otros, que pueden actuar de forma autónoma. El SCN coordina dichos relojes periféricos entre sí, regulando así los ritmos circadianos de la fisiología humana.¹

El sistema circadiano está regulado principalmente por la melatonina, una neurohormona secretada por la glándula pineal. La luz es el principal regulador de esta hormona puesto que inhibe su formación.^{1,2} De esta manera, su secreción se produce en condiciones de oscuridad, por lo que aumenta inmediatamente tras la puesta de sol y disminuye antes de que salga el sol, manteniéndose unos niveles bajos de melatonina durante el día.³

Las células ganglionares de la retina intrínsecamente fotosensibles (ipRGC) contienen un fotorpigmento conocido como melanopsina, estimulada por la melatonina, se encarga de transmitir la señal de luz u oscuridad. La melanopsina no responde de la misma manera a todas las longitudes de onda del espectro, sino que es más sensible a la luz azul. Concretamente, la supresión máxima de melatonina se induce por una longitud de onda cercana a los 460 nm⁴, que se corresponde con el máximo de sensibilidad de las células ipRGC.

A parte de la importancia de la supresión de esta hormona en lo referido al ciclo circadiano, se han realizado numerosos estudios epidemiológicos que relacionan la inhibición de secreción de esta hormona con enfermedades como el cáncer, obesidad, diabetes y riesgos cardiovasculares, entre otros.^{1,3}

Desde hace años está muy extendido el uso de las nuevas tecnologías, en un estudio realizado en 2009, en una población de estudiantes universitarios estadounidenses, se informa que pasan un promedio de 12 horas diarias utilizando algún tipo de tecnología digital. El uso de estos dispositivos durante la noche, antes de intentar dormir, puede afectar a conciliar el sueño debido, como hemos visto antes, a la alteración del ritmo circadiano. En una encuesta que se realizó en 2011 en EE. UU., se vio que el 67% de los encuestados usa teléfonos móviles y el 60% ordenadores portátiles antes de dormir.⁵

Destaca el aumento del uso de los teléfonos móviles, que se han vuelto indispensables en nuestro día a día. De 98 minutos de uso en 2011 se duplicó a 195 minutos en 2013.⁶

Los LED (diodo emisor de luz) han pasado a ser la tecnología de iluminación dominante para la fabricación de las pantallas de teléfonos, tabletas y ordenadores portátiles. El LED más común es el de luz blanca, se trata de una fuente dicromática que acopla un LED azul con un fósforo amarillo. Este tipo de LED presenta un pico de emisión alrededor de 450-470 nm, como podemos ver en la figura 1,⁷ que coincide con el máximo de absorción de la melanopsina. Esto quiere decir, que este tipo de LED activa la melanopsina de las ipRGC las cuales transmiten esta información al SCN inhibiendo así la secreción de melatonina.

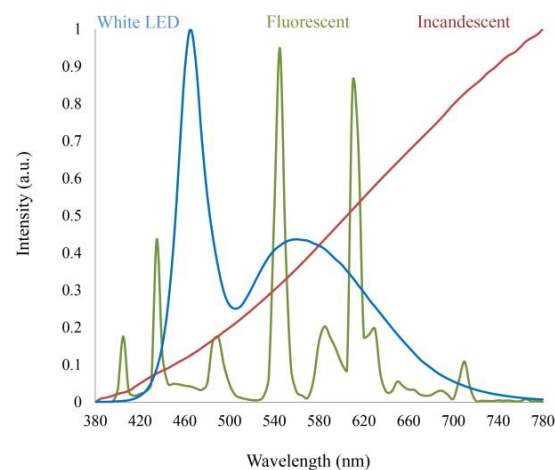


Figura 1. Comparación del espectro de un LED de luz blanca, una lámpara fluorescente y una fuente incandescente. *Effects of blue light on the circadian system and eye physiology. (2016). Molecular Vision, 22, 61-72.*

En la última década, ha aumentado el interés por las lentes oftálmicas con filtros para la luz azul denominadas lentes de “bloqueo azul” diseñadas para reducir la radiación azul. Estas lentes pueden presentar cromóforos, o tratamientos de interferencia antirreflejantes sobre la superficie oftálmica, que absorben selectivamente las longitudes de onda corta. Además, la mayoría de los dispositivos optoelectrónicos ofrecen una opción de configuración “nocturna” para filtrar la luz azul que emiten. A parte de los problemas para conciliar el sueño que puede provocar la radiación azul, se ha sugerido que estos filtros disminuyen la fatiga visual y pueden prevenir la degeneración macular asociada a la edad. Sería de gran interés encontrar evidencia científica de que las lentes para gafas con filtro azul atenúen dichos problemas, puesto que dichas lentes suponen un coste adicional para el consumidor.⁸

En un estudio presente en la edición de Óptica Oftálmica y Fisiológica, Lawrenson et al, donde se muestran los posibles beneficios y daños de este tipo de lentes, destacó la falta de pruebas clínicas que confirmen un efecto beneficioso de las lentes con filtros para la luz azul para reducir la fatiga ocular, mejorar el sueño o proteger la mácula.⁹

En este trabajo, vamos a estudiar la eficacia de dos sistemas de filtrado de la radiación azul para distintos dispositivos optoelectrónicos. Compararemos el efecto de los filtros digitales y de filtros ópticos. Los primeros, son aquellos filtros que lleva incorporado el software de los propios dispositivos, y que, por lo tanto, reducen la radiación azul emitida por ellos. En muchos dispositivos, los filtros digitales se denominan “modo lectura” o “modo noche”. Los filtros ópticos, son filtros analógicos, esto quiere decir que reducen la banda azul del espectro transmitida por los dispositivos. Es decir, ambos están diseñados para llevar a cabo el mismo cometido, reducir la radiación azul, la diferencia entre ambos viene dada porque los filtros digitales actúan antes de que dicha radiación sea emitida y los filtros ópticos-analógicos absorben la radiación una vez ha sido emitida por los dispositivos. Para realizar un análisis cuantitativo de la eficacia de ambos sistemas de filtros, mediremos la distribución espectral de diferentes dispositivos (dos smartphones, una tableta y un ordenador portátil) sin filtros y con ambos tipos de filtros. Los filtros ópticos que hemos manejado, los encontramos montados en gafa o adaptados a la pantalla del propio dispositivo.

En segundo lugar, determinaremos si los dispositivos suponen un riesgo para la supresión de melatonina y, por tanto, para la alteración de los ritmos circadianos. Para ello calcularemos dos factores: la iluminación circadiana y el índice de supresión de melatonina.

2- OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es evaluar la efectividad de los filtros digitales que incorporan los dispositivos optoelectrónicos como los smartphones, los ordenadores portátiles y las tabletas, para reducir la intensidad de la banda azul de su espectro de emisión y de los filtros ópticos adaptados en gafa o acoplados a la pantalla del dispositivo, que absorben parcialmente la radiación que emiten dichos dispositivos y que llega a la pupila del observador. Los objetivos específicos son:

1. Analizar las características de los diferentes sistemas de filtrado de la radiación azul que reciben los usuarios de los dispositivos optoelectrónicos: filtros digitales y filtros ópticos adaptados en gafa o acoplados a la pantalla del dispositivo.
2. Calcular el rendimiento de los filtros digitales y de los filtros ópticos para todos los dispositivos analizados en las condiciones habituales de utilización.
3. Realizar un análisis comparativo entre ambos sistemas de filtros en relación con el rendimiento en la reducción de la radiación azul que recibe el usuario.
4. Realizar un análisis comparativo de la iluminación circadiana emitida por cada uno de los dispositivos, en función de la distancia, el brillo de las pantallas y el modo lectura del dispositivo.
5. Evaluar el efecto de los filtros digitales y de los filtros ópticos en la reducción de la iluminación circadiana (CIL). Realizaremos un análisis comparativo entre ambos sistemas de filtros.
6. Obtener el índice de supresión de melatonina (MSI) de los distintos dispositivos optoelectrónicos y evaluar el efecto de los dos sistemas de filtros en la reducción de este parámetro.

3- RADICIÓN EMITIDA POR LOS DISPOSITIVOS OPTOELECTRÓNICOS: PARÁMETROS FOTOFÍSICOS

Hoy en día, la mayoría de los dispositivos optoelectrónicos están fabricados con pantallas de cristal líquido (LCD), aunque en los últimos años, ha crecido el número de pantallas con una tecnología basada en diodos orgánicos emisores de luz (OLED). A diferencia de la pantalla LCD, una pantalla con una tecnología de iluminación basada en los OLED es una pantalla emisiva. Su estructura consiste en pilas orgánicas intercaladas entre el ánodo y el cátodo, al aplicar voltaje, los electrones y los huecos que van desde el cátodo y el ánodo, respectivamente, son conducidos a la capa emisora para que produzcan luz.¹⁰ Las pantallas LCD utilizan una fuente de luz, mientras que las pantallas LED están basadas en diodos emisores de luz con tres máximos de emisión: azul, verde y rojo.

En la figura 2, se muestra la distribución espectral de la radiación emitida por uno de los dispositivos analizados en este trabajo: ordenador portátil ASUS X541UA-XX133. En ella se muestra en que longitud de onda está el máximo de emisión para cada LED: azul (444,3 nm), verde (542,0 nm) y rojo (586,6 nm).

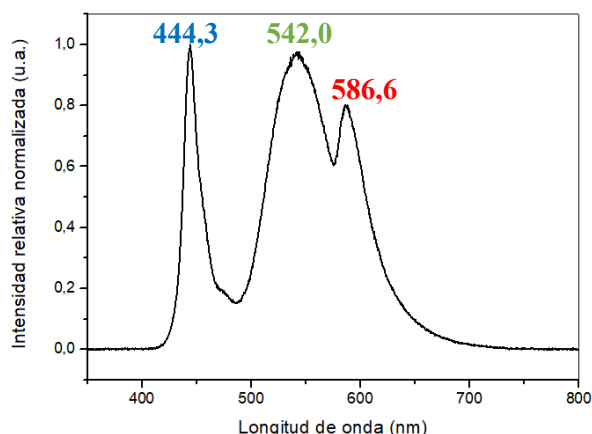


Figura 2. *Distribución espectral de intensidades de la radiación emitida por el portátil ASUS sin filtro normalizado al máximo de este espectro.*

El software de los dispositivos estudiados presenta filtros digitales diseñados para reducir la radiación azul emitida por los dispositivos. Sin embargo, aunque este filtro está pensado para reducir la emisión de la zona azul del espectro, también puede actuar en otras partes del espectro, aunque en menor medida. En la figura 3 se muestra el efecto del filtro para luz azul al 50% del portátil ASUS. Como se puede observar, el filtro para la radiación azul de este dispositivo actúa en todo el espectro, con su máximo de eficacia en la banda azul del espectro.

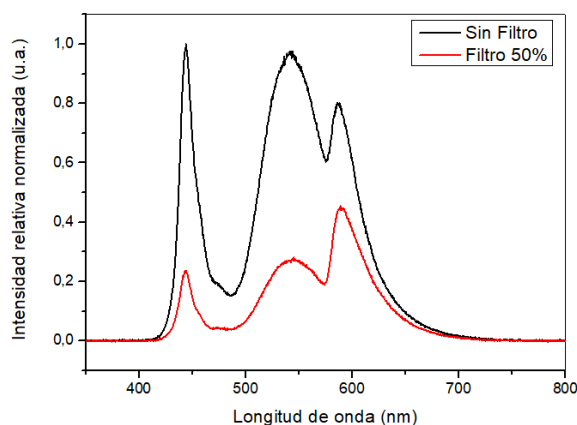


Figura 3. *Distribución espectral de intensidades de la radiación emitida por el portátil ASUS sin filtro y con el filtro al 50%, normalizados ambos espectros al máximo del espectro del dispositivo sin filtro.*

Los filtros ópticos analizados han sido creados para el mismo cometido que los filtros digitales. En la figura 4 se presenta la distribución espectral del portátil ASUS con el filtro óptico montado en la gafa Contour, a modo de ejemplo.

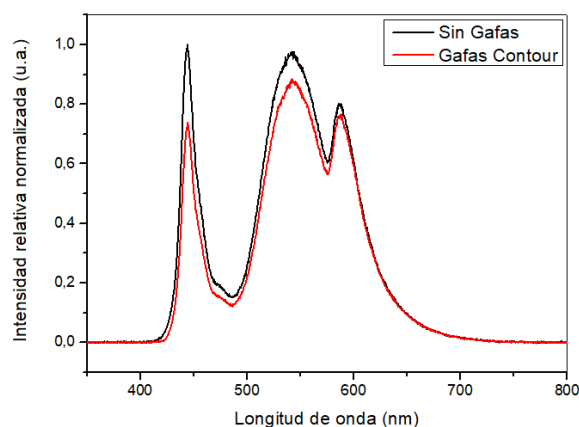


Figura 4. *Distribución espectral de intensidades de la radiación emitida por el portátil ASUS sin filtro y con el filtro óptico montado en la gafa Contour, normalizados ambos espectros al máximo de emisión del espectro del dispositivo sin gafas.*

Para poder determinar la eficacia de ambos sistemas de filtrado, hemos definido un parámetro al que hemos denominado como: **rendimiento de reducción de la radiación azul (η_{rb})**.

$$\eta_{rb} = \frac{A_t - A_f}{A_t} \times 100 \quad (1)$$

Donde A_t representa el área bajo la curva del espectro del dispositivo sin ningún tipo de filtro y A_f es el área bajo la curva del espectro del dispositivo con filtro.

Con el fin de cuantificar el efecto nocivo de la radiación azul emitida por los dispositivos, utilizaremos la función de sensibilidad espectral circadiana basada en el modelo Gall¹¹, esta función se obtuvo a partir de los valores experimentales de supresión de melatonina para distintas longitudes de onda obtenidos por Brainar et al¹² y Thapan et al¹³. En la figura 5 podemos ver la curva de sensibilidad espectral circadiana $C(\lambda)$ junto con la función de sensibilidad espectral del ojo en visión fotópica $V(\lambda)$.

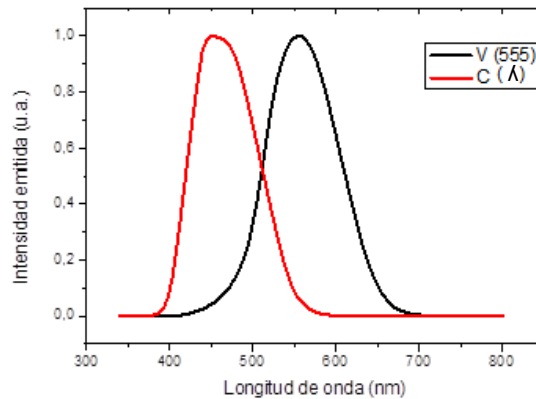


Figura 5. Función de sensibilidad espectral circadiana $C(\lambda)$ y función de sensibilidad espectral del ojo en visión fotópica $V(555)$.

Para el análisis cuantitativo de la distribución espectral de intensidades de la radiación emitida por los dispositivos optoelectrónicos vamos a utilizar los siguientes parámetros:

- **Rendimiento (eficacia) Luminoso de la Radiación (LER).** Se define como la ratio entre el flujo luminoso y el flujo radiante.

$$LER = 683 \text{ (lm/w)} \frac{\int V(\lambda)S(\lambda)d(\lambda)}{\int S(\lambda)d(\lambda)} \quad (2)$$

Donde $V(\lambda)$ representa la curva de sensibilidad espectral del ojo en visión fotópica o escotópica y la $S(\lambda)$ la distribución espectral de la intensidad emitida por el dispositivo. En todos los cálculos realizados emplearemos la de visión fotópica centrada en una longitud de onda de $\lambda=555\text{nm}$.

- **Rendimiento (eficacia) circadiana de la radiación (CER).** Se define como la ratio entre el flujo circadiano y el flujo radiante.

$$CER = 683 \text{ (lm/w)} \frac{\int C(\lambda)S(\lambda)d(\lambda)}{\int S(\lambda)d(\lambda)} \quad (3)$$

Donde $C(\lambda)$ es la función de sensibilidad circadiana de las células ganglionares de la retina según el modelo de Gall¹¹.

- **Factor de acción circadiana (CAF).** Se define como la ratio entre rendimiento circadiano y el rendimiento luminoso.

$$CAF \left(\frac{blm}{lm} \right) = \frac{CER(bl m)}{LER(l m)} \quad (4)$$

- **Iluminación circadiana (CIL).** Se calcula multiplicando la iluminación E (lux) por el factor de acción circadiana.

$$CIL (blx) = E(lx) * CAF \quad (5)$$

Para realizar los cálculos de estos parámetros hemos normalizado los espectros de emisión de los dispositivos a la máxima longitud de onda de la distribución espectral de los dispositivos sin ningún tipo del filtro. Por ejemplo, como se puede ver en la figura 2, para el ordenador portátil se ha normalizado al máximo del azul que se corresponde con $\lambda = 444,3$ nm.

En la figura 6, se puede observar la curva del valor relativo de supresión de melatonina en función de la iluminación circadiana (CIL) de un LED azul de 470 nm. En dicha curva, se puede ver que prácticamente no se produce supresión de melatonina hasta los 47 blx, que suponen una supresión de esta hormona del 10%, a partir de ahí, la supresión de melatonina comienza a aumentar drásticamente.

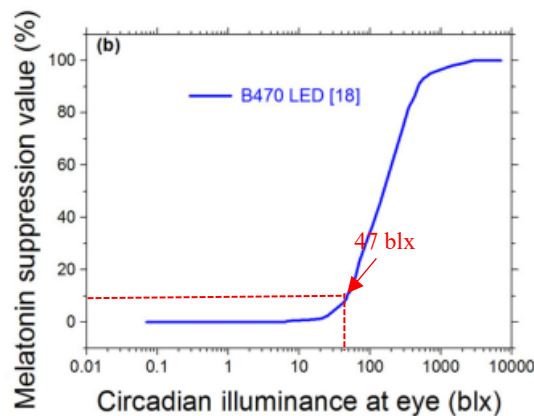


Figura 6. Niveles de supresión de melatonina en función de la iluminación circadiana. *Multi-function indoor light sources based on light-emitting diodes—a solution for healthy lighting. Optics Express, 24(21), 24401-24412. (2016).*

Según el espectro del sol CIE-D65, en un día soleado, ajustado al MSAS (espectro de acción de supresión de la melatonina)², figura 7, podemos calcular el índice de supresión de melatonina (MSI) mediante la ecuación 6, propuesta por Aube et al¹⁴.

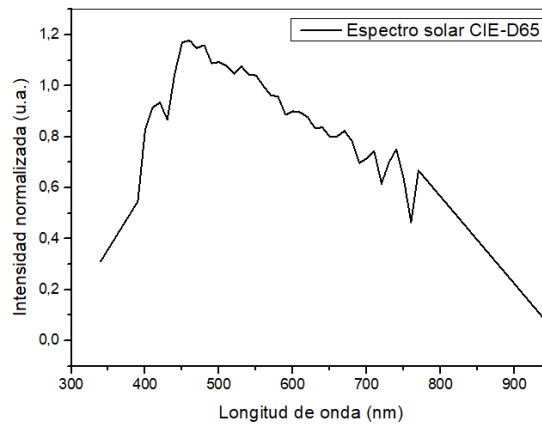


Figura 7. Espectro solar CIE-D65 ajustado al MSAS.

$$MSI = \frac{\int S(\lambda)C(\lambda)d(\lambda)}{\int S_{CIE-D65}(\lambda) C(\lambda)d(\lambda)} \quad (6)$$

Al calcular este parámetro, hay que tener en cuenta que el espectro azul de la luz solar inhibe completamente la secreción de melatonina, por lo tanto, al sol se le atribuye un MSI=1.

4- CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS DISPOSITIVOS Y DE LAS GAFAS ANALIZADAS

En este trabajo, hemos analizado filtros ópticos montados en gafas o adaptados directamente sobre el dispositivo. En la tabla 1, se muestran las nueve gafas con filtros ópticos para la luz azul, y un filtro óptico, de la casa Reticare, exclusivo para iPhone, que se coloca directamente sobre la pantalla del dispositivo.

Tabla 1. *Fotografía de las gafas con filtros ópticos para la radiación azul analizadas en este trabajo. En último lugar, se muestra el filtro óptico Reticare que se adapta directamente sobre la pantalla del dispositivo.*

FILTROS ÓPTICOS

| | |
|-----------------------------|--|
| Gafas ATTCL |  |
| Gafas Alain Afflelou |  |
| Gafas para ordenador |  |
| Gafas Cysux |  |
| Gafas TR90 |  |
| Gafas graduadas |  |
| Gafas Horus X |  |




| | |
|------------------------------------|--|
| Gafas Contour |  |
| Gafas Reading modelo 2016 5 |  |
| Filtro Reticare |  |

Los cuatro dispositivos optoelectrónicos analizados han sido: dos smartphones, un ordenador portátil y una tableta. En la tabla 2, se muestran las características de estos dispositivos.

Los dispositivos estudiados han sido los smartphones VIVO y72 y iPhone 14 Pro, ordenador portátil ASUS, concretamente el modelo X541UA-XX133 y una tableta Huawei MatePad Pro MRX-W09. El primero de ellos es un smartphone de gama media-baja con una tecnología de iluminación LCD IPS, mientras que el iPhone 14 es un dispositivo móvil de gama alta cuya pantalla tiene un sistema de iluminación OLED. Las pantallas LCD IPS consiguen una alta calidad en representación de color, contraste y ángulos de visión. La tecnología OLED (Organic Light-Emitting Diode) cuenta un diodo emisor de luz por cada píxel, es decir, cada píxel está iluminado por separado. Con este tipo de tecnología se consiguen pantallas de muy alta calidad, se utiliza para dispositivos de gama alta.

La tableta Huawei presenta la misma tecnología de iluminación que el móvil VIVO, es decir, una pantalla LCD IPS, mientras que el ordenador portátil ASUS ha sido fabricado con una tecnología de pantalla que se basa en el sistema de retroiluminación basado en leds.

Tabla 2. Características de los dispositivos utilizados en este trabajo.

| Dispositivo | Año | Pantalla | Sistema | Dimensiones (mm) | Peso |
|---|------|-------------------------|-----------------------------------|----------------------|-------|
| Optoelectrónico | | | | | |
| Móvil VIVO y72 | | | | | |
|  | 2021 | 6,58'' 2408 x 1080px | Android 11 | 163,95 x 75,3 x 8,50 | 193gr |
| iPhone 14 Pro | | | | | |
|  | 2022 | 6,12'' 2556 x 1179px | iOS16 | 147,5 x 71,5 x 7,80 | 206gr |
| Ordenador Portátil ASUS | | | | | |
| X541UA-XX133 | | | | | |
|  | 2016 | 15,6'' 1366 x 786px | Windows 10 | 381,4 x 251,5 x 27,6 | 2Kg |
| Tablet Huawei MatePad Pro | | | | | |
| MRX-W09 | | | | | |
|  | 2021 | 10,8'' 2560 x 1600px | EMUI 10 (basado en Android 10) | 246 x 159 x 8 | 460gr |

5. MÉTODOS EXPERIMENTALES

5.1. Magnitudes físicas

Con el fin de comprobar cómo actúan los filtros ópticos incorporados en gafas sobre las distintas longitudes de onda, mediremos sus espectros de transmisión y absorción.

Para analizar la radiación emitida por los diferentes dispositivos optoelectrónicos utilizados, medimos dos parámetros básicos: la distribución espectral de la radiación emitida por los dispositivos $S(\lambda)$ y la iluminación E que le llegaría al observador. El primer parámetro representa la distribución de la intensidad en función de la longitud de onda emitida $I(\lambda)$, y el segundo representa el flujo de luz que llega al plano de la pupila del observador por unidad de superficie ($E=F/S$).

La iluminación se mide en lux (lm/m^2) la hemos medido en función de la distancia, el brillo de la pantalla y el nivel de filtro para la radiación azul de cada uno de los dispositivos. La distribución espectral de los dispositivos la mediremos con filtros digitales y con filtros ópticos.

Con todos estos parámetros podremos analizar y comparar la efectividad de los filtros ópticos que se comercializan para la luz azul frente al propio filtro que llevan incorporados los distintos dispositivos.

5.2. Técnicas experimentales

- Instrumentos de medida

Los espectros de absorción y la transmisión de los filtros ópticos fueron medidos con un espectrofotómetro de doble haz de la casa JASCO que abarca un rango de longitudes de onda de 300nm-900nm con un intervalo de 1nm entre ellas. En la figura 8, se muestra una imagen de este espectrofotómetro.

Las medidas de la distribución espectral de intensidades $I(\lambda)$ de los dispositivos se tomaron con un espectrofotómetro USB 2000+ de la casa OCEAN OPTICS que permite la adquisición de longitudes de onda en un rango de 250nm-1100nm con una resolución de 0.7 nm para todas las longitudes de onda. La luz emitida por los dispositivos es recogida por una fibra óptica de 600 μm de diámetro acoplada al espectrofotómetro, y conectada a la vez a un ordenador que incluye un software llamado Ocean View 2.0. Con este software, que sólo funciona con sistema operativo de Windows, podremos visualizar la radiación de los dispositivos captada por la fibra. Utilizamos el programa Origin Version 9.0 para analizar los datos obtenidos. En la figura 9, se muestran dos imágenes, la fibra a la derecha y el espectrofotómetro a la izquierda.

Para medir la iluminación (E) hemos usado un luxómetro GOSSEN modelo MAVOLUX 5032B con un rango de las medidas entre 0.01 y 20000 lux, que se puede observar en la figura 10. La sensibilidad de este instrumento depende de la iluminación a la que este expuesto, estando alrededor del 1% de su valor.



Figura 8. Espectrofotómetro de doble haz la casa JASCO modelo V-650.



Figura 9. Fibra óptica de 600 μm de diámetro y espectrofotómetro USB 2000+ de la casa OCEAN OPTICS.



Figura 10. Luxómetro de la casa GOSSEN modelo MAVOLUX 5032B.

- **Montaje experimental**

Para medir la absorción y la transmisión, hemos colocado los filtros ópticos dentro del espectrofotómetro, de manera que el haz de luz emitido por el instrumento los atraviese. En la figura 11, podemos ver la disposición de las gafas para que el haz de luz pasará a través de la lente sin ningún tipo de impedimento.

Las medidas de la intensidad espectral y de la iluminación, se han realizado en incidencia normal, en todo momento la fibra apuntaba al centro de las pantallas. Para minimizar el error de estas medidas, se disponen tanto los dispositivos como la fibra y el luxómetro sobre un banco óptico de manera que el error de la distancia es de 2 mm.

La iluminación la hemos medido a distintas distancias. Para la medida de los espectros emitidos por los dispositivos, los hemos colocado a una distancia normal de uso. El Portátil a 40 cm y la Tablet a 30 cm, de manera que ambos subtendían un ángulo de $26,3^\circ$ desde la fibra. Para que los móviles formaran dicho ángulo, tendrían que estar a 16,2 cm, lo que requiere una acomodación de 6D, está situación no es cómoda ni real, por lo tanto, los hemos colocado a la distancia del punto próximo del ojo, es decir, a 25 cm de la fibra. En todos los casos, hemos medido la intensidad espectral emitida por los dispositivos mientras se mostraba la pantalla principal del buscador Google, y con un brillo de pantalla máximo.

Como se puede observar en la figura 12, los dispositivos se sitúan frente a la fibra óptica y al sensor del luxómetro. Los filtros ópticos, los colocaremos entre el dispositivo y la fibra o sensor, justo delante de estos, tal y como aparece en la figura 13. En el caso del filtro para el móvil lo ponemos directamente sobre el móvil.



Figura 11. *Filtro óptico-analógico montado en gafa ATTCL en el espectrofotómetro de doble haz.*

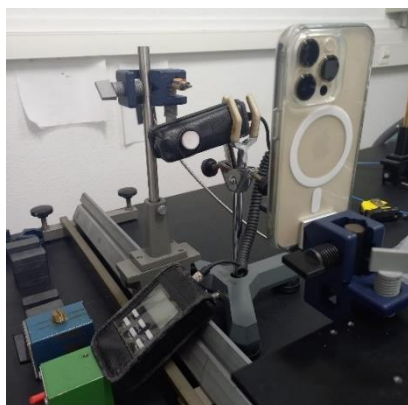


Figura 12. *Fibra óptica y sensor del luxómetro frente al iPhone 14 Pro*

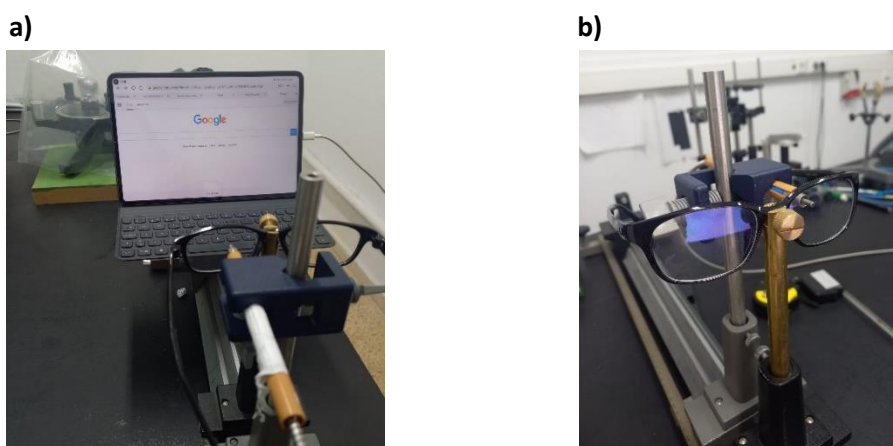


Figura 13. *A) Montaje experimental para medir la distribución espectral de la tableta Huawei con las gafas para ordenador. b) Disposición de los filtros ópticos montados en gafas respecto a la fibra óptica.*

5.3. Medidas experimentales

En este trabajo hemos llevado a cabo la medida de cuatro magnitudes físicas en diferentes condiciones de trabajo, con las que luego podremos calcular los parámetros definidos anteriormente. En todos los casos las medidas se han tomado con las luces del laboratorio apagadas.

1. Absorción y transmisión de los filtros ópticos-analógicos montados en gafa.
2. Variación de la iluminación E en función de la distancia, del nivel del modo lectura, brillo de la pantalla y de los distintos filtros ópticos-analógicos montados en gafa.
3. Distribución espectral emitida por los dispositivos $S(\lambda)$ para distintos niveles del modo lectura y para los distintos filtros ópticos-analógicos montados en gafa.

Con las medidas de la distribución espectral y de la iluminación, determinaremos la iluminación circadiana (CIL) en función de la distancia, el nivel de modo lectura y los filtros ópticos. Para el cálculo del índice de supresión de melatonina MSI, solo nos hará falta la distribución espectral con ambos tipos de filtros.

6. RESULTADOS

En primer lugar, vamos a analizar los filtros ópticos en función de sus espectros de absorción y transmisión, valorando como actúan en la banda espectral del azul. A continuación, se muestran la distribución espectral emitida por los dispositivos, a partir de estos, calcularemos el rendimiento de los filtros digitales y ópticos.

Valoraremos como varía la iluminación E frente a la distancia, el nivel de filtro digital y el brillo de la pantalla. Con este parámetro, podremos calcular la iluminación circadiana CIL, y analizaremos como varía en función del nivel de filtro.

Por último, se muestran los resultados del índice de supresión de melatonina de cada dispositivo y de cada filtro.

6.1. Características de los filtros ópticos

En este estudio, la primera medida que tomamos fue los espectros de absorción y transmisión de los filtros ópticos, con el fin de observar el efecto de cada uno de ellos sobre la zona del espectro de 400-500nm.

La absorción y la transmisión son dos parámetros físicos relacionados entre sí que hacen referencia al proceso físico de la luz pasando a través de una muestra, para poder expresar dicha relación, se habla de densidad óptica (DO) y transmitancia, estos conceptos hacen referencia al valor matemático, y presentan la siguiente relación:

$$DO = -\log T \quad (7)$$

Por la tanto, según está ecuación, si un filtro transmite el 100% de la luz que incide en él, la absorción será igual a cero. De esta manera, si la absorción aumenta, la transmitancia disminuye, y viceversa. En la figura 14 podemos ver claramente que esta relación está presente en todos los filtros ópticos.

Los espectros han sido medidos desde 300nm-900nm, pero como los dispositivos solo emiten en el visible, es decir, de 400nm-700nm, nos vamos a centrar en ese rango de longitudes de onda, de manera que mostraremos los espectros de absorción y transmisión en el visible.

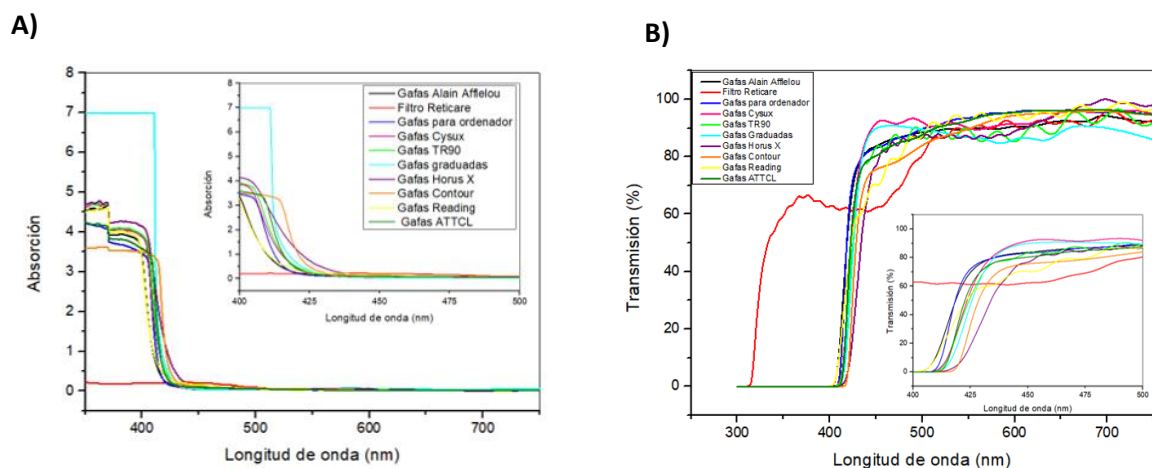


Figura 14. A) *Espectros de absorción de los filtros ópticos.* B) *Espectros de transmisión de los filtros ópticos.* En los recuadros internos se muestra una ampliación de la zona azul del espectro (400nm-500nm).

Todos los filtros ópticos presentan un espectro de absorción que sigue el mismo patrón: apenas absorben hasta pasados los 450nm, y a partir de 430 nm, aproximadamente, la absorción empieza a aumentar drásticamente. El filtro Reticare sigue otra dinámica, no absorbe nada hasta los 500nm, pasada esta longitud de onda, aumenta levemente la absorción, llegando a una densidad óptica poco mayor de 0,2.

Vamos a analizar los valores de transmitancia y de densidad óptica que presentan los filtros ópticos para una longitud de onda de 460 nm, que coincide con el máximo de sensibilidad circadiana de las células ganglionares del ojo. En la tabla 3, se muestran dichos valores.

Tabla 3. *Valores de transmitancia y de densidad óptica para una longitud de onda de 460 nm de los filtros ópticos montados en gafa y adaptados directamente sobre la pantalla del dispositivo.*

| | Trasmitancia | Densidad óptica |
|-----------------------------|--------------|-----------------|
| Gafas ATTCL | 82,30% | 0,085 |
| Gafas Alain Afflelou | 85,23% | 0,094 |
| Gafas para ordenador | 84,26% | 0,074 |
| Gafas Cysux | 92,54% | 0,034 |
| Gafas TR90 | 82,87% | 0,088 |
| Gafas graduadas | 90,72% | 0,042 |
| Gafas Horus X | 81,71% | 0,089 |
| Gafas Contour | 76,77% | 0,115 |
| Gafas Reading | 75,04% | 0,125 |
| Filtro Reticare | 63,55% | 0,197 |

Los filtros ópticos que menos absorben en esta longitud de onda son los montados en las gafas Cysux, con una DO de 0,034 ,y en las gafas graduadas, que presenta una DO de 0,042. Por el contrario, el filtro óptico con mayor capacidad de reducción en 460 nm es el filtro adaptado directamente sobre la pantalla del dispositivo, este llega a absorber casi el 20% de la radiación emitida en dicha longitud de onda.

Los filtros ópticos de las gafas contour y de las gafas reading, consiguen superar el 10% de absorción, siendo el valor de la DO de 0,115 y 0,125, respectivamente, mientras que los filtros ópticos incorporados en el resto de gafas, presentan una densidad óptica que oscila entre 0,07-0,09, aproximadamente.

Con todo esto, podemos concluir que el filtro óptico Reticare es el que más absorbe en el máximo de sensibilidad de las células ganglionares.

6.2. Distribución espectral: $S(\lambda)$

En este apartado, se muestra la distribución espectral emitida por los dispositivos en función del nivel de filtro digital y, por otro lado, en función de los filtros ópticos-analógicos. Para cada caso, tendremos dos gráficas, a la derecha se muestran los espectros en el rango del visible (400-700nm), y a la izquierda la ampliación de la banda azul del espectro (400-500nm).

En todos los casos la distribución espectral ha sido medida con las luces apagadas con el objetivo de reducir el ruido y con la página principal de Google en la pantalla del dispositivo, para un brillo de pantalla máximo. Dichas capturas se han realizado con un tiempo de integración pequeño de 3ms para minimizar el ruido, a excepción del espectro del iPhone 14, que tuvimos que aumentar el tiempo de integración a 1s debido a la baja intensidad de emisión. La distancia ha variado para cada dispositivo tal y como se explica en el punto 5.2 (página 18).

Todos los espectros que aparecen en las figuras 15, 16, 17 y 18, están normalizados al máximo del espectro correspondiente al dispositivo sin ningún tipo de filtro. Para cada dispositivo, arriba se muestra el espectro en función del filtro digital y abajo en función de los filtros ópticos, menos en el caso del iPhone 14, como este smartphone solo lo estudiamos con un filtro óptico, se muestra todo en la misma gráfica.

Móvil VIVO

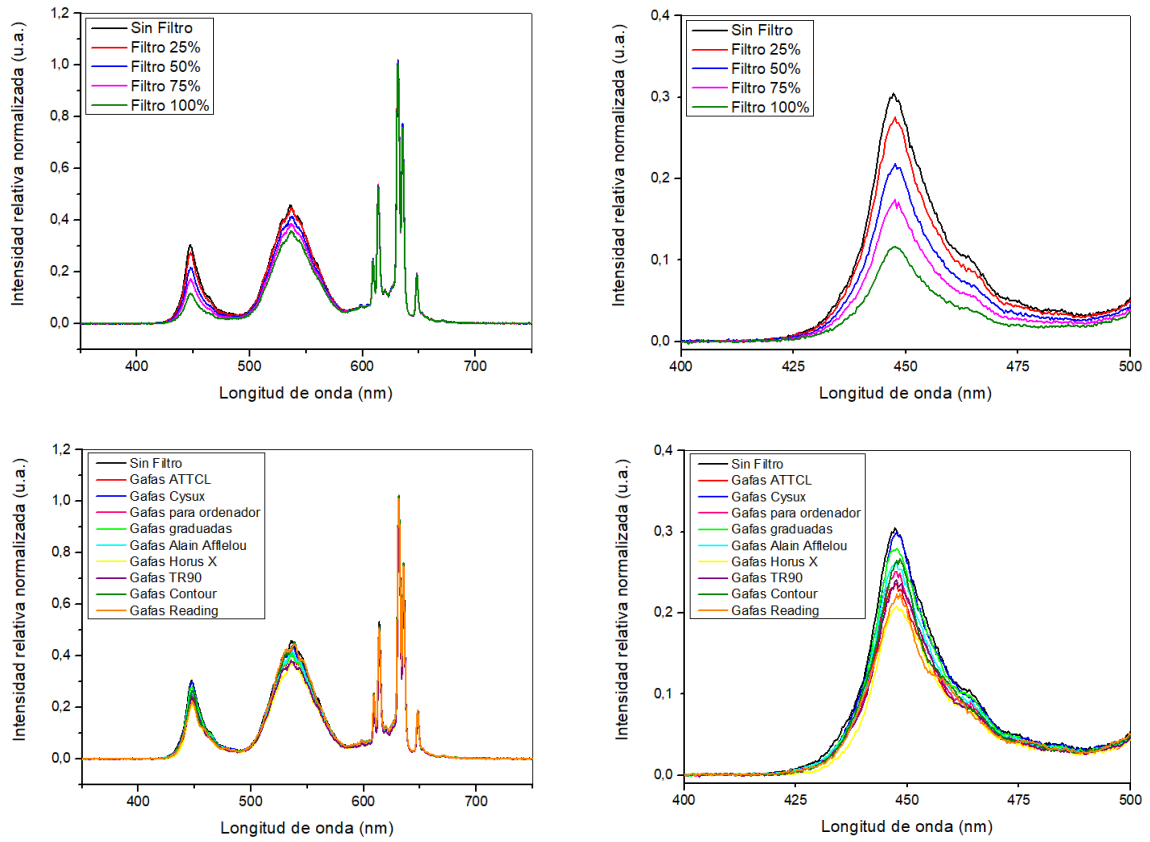


Figura 15. Distribución espectral de la radiación emitida por el móvil VIVO sin filtro, con los filtros digitales y con los filtros ópticos-analógicos montados en gafas.

IPhone 14 Pro

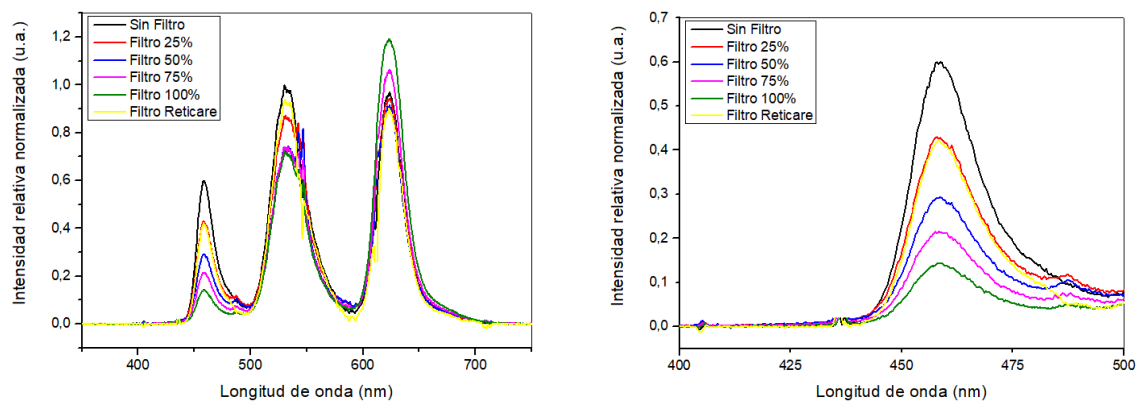


Figura 16. Distribución espectral de la radiación emitida por el iPhone 14 sin filtro, con los filtros digitales y con el filtro óptico-analógico de Reticare.

Ordenador portátil ASUS

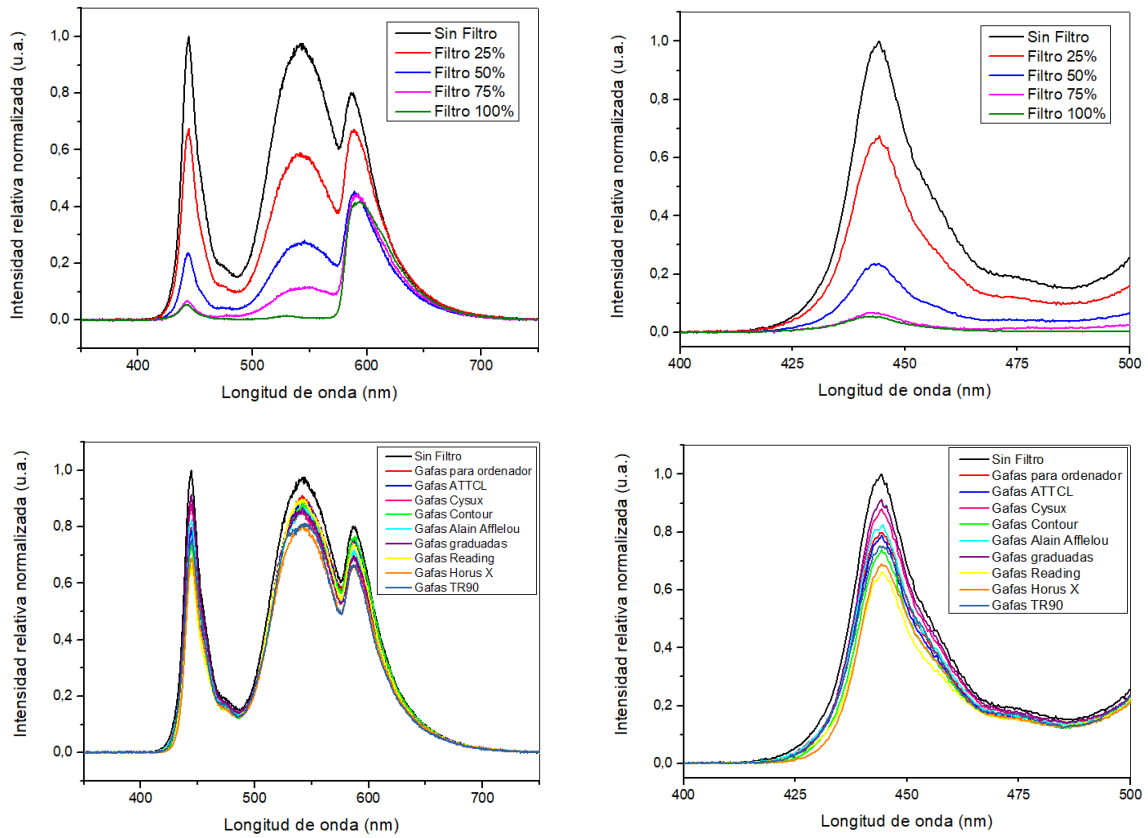
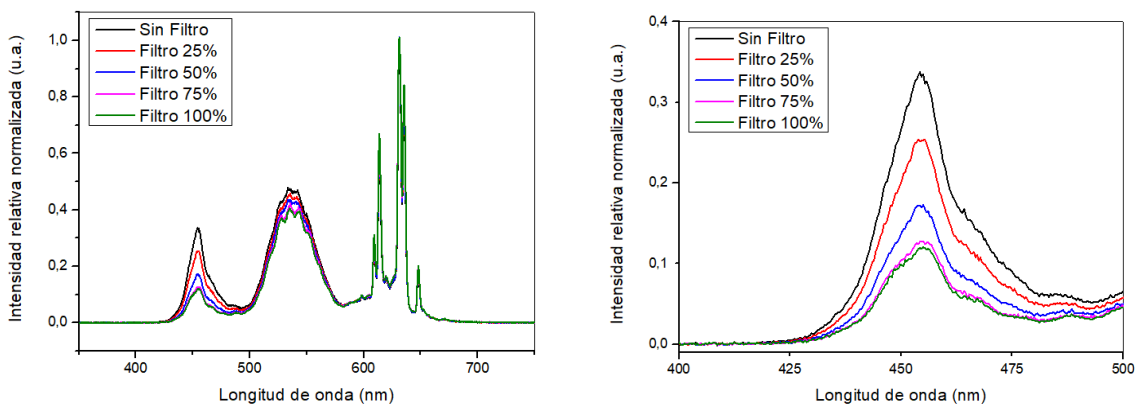


Figura 17. Distribución espectral de la radiación emitida por el ordenador portátil ASUS sin filtro, con los filtros digitales y con los filtros ópticos-analógicos montados en gafas.

Tableta Huawei



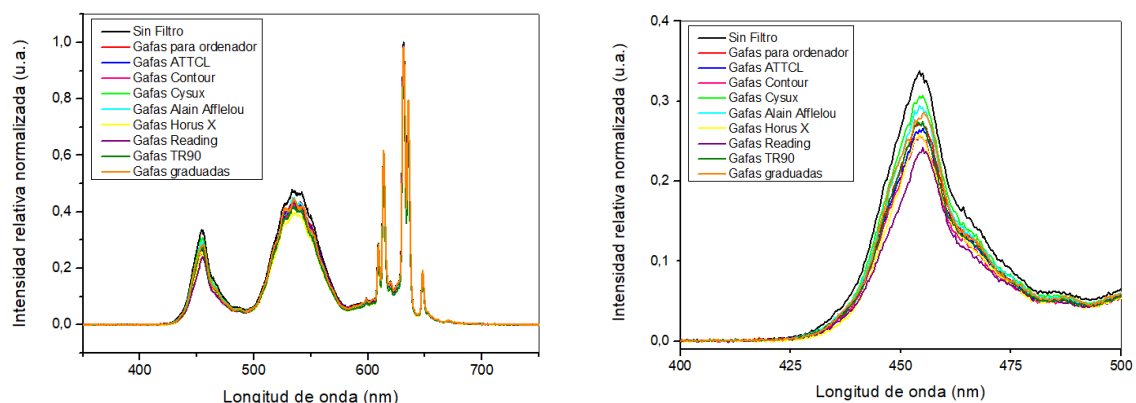


Figura 18. Distribución espectral de la radiación emitida por la tableta Huawei sin filtro, con los filtros digitales y con los filtros ópticos-analógicos montados en gafas.

6.3. Rendimiento de reducción de la radiación azul (η_{rb}).

Con el fin de comprobar y comparar cuantitativamente la eficacia de los filtros digitales y de los filtros ópticos, hemos calculado el rendimiento de reducción de la luz azul (η_{rb}). A partir de los espectros normalizados al máximo de la banda espectral del azul del espectro del dispositivo sin filtro, hemos obtenido el área bajo la curva de los dispositivos sin filtro y con filtro, en la zona del azul. Con estos datos, y con la ecuación 1 que aparece en la sección 3 (página 9), calculamos el rendimiento. En la tabla 4, se muestran los valores de rendimiento obtenidos con cada tipo de filtro para los cuatro dispositivos. El error estimado de este parámetro es inferior al 1%.

Tabla 4. Rendimiento de reducción de la radiación azul (η_{rb}) de los filtros digitales y de los filtros ópticos para los cuatro dispositivos estudiados.

| | Móvil VIVO | IPhone 14 | Portátil ASUS | Tableta Huawei |
|-----------------------------|------------|-----------|---------------|----------------|
| Filtro 25% | 0,10 | 0,20 | 0,34 | 0,23 |
| Filtro 50% | 0,28 | 0,40 | 0,77 | 0,46 |
| Filtro 75% | 0,42 | 0,56 | 0,93 | 0,58 |
| Filtro 100% | 0,59 | 0,71 | 0,95 | 0,60 |
| Gafas Cysux | 0,05 | - | 0,09 | 0,07 |
| Gafas Graduadas | 0,08 | - | 0,12 | 0,10 |
| Gafas Alain Afflelou | 0,13 | - | 0,16 | 0,13 |
| Gafas para ordenador | 0,17 | - | 0,18 | 0,17 |
| Gafas TR90 | 0,20 | - | 0,20 | 0,19 |
| Gafas ATTCL | 0,21 | - | 0,20 | 0,20 |
| Gafas Contour | 0,23 | - | 0,26 | 0,23 |
| Gafas Horus X | 0,29 | - | 0,29 | 0,25 |
| Gafas Reading | 0,29 | - | 0,30 | 0,28 |
| Filtro Reticare | - | 0,32 | - | - |

Aunque tanto los filtros digitales como los filtros ópticos están diseñados para reducir la radiación azul, hemos querido comprobar el efecto de dichos filtros sobre todo el rango de emisión de los dispositivos, para ello, definimos un nuevo parámetro al que llamaremos rendimiento de reducción de la radiación total (η_t). Para calcularlo, seguiremos un procedimiento similar al explicado para el cálculo el rendimiento de reducción de la radiación azul, calculamos el área bajo la curva de los espectros normalizados al máximo del espectro del dispositivo sin filtro y, mediante la ecuación 1 (página 9), podemos obtener los valores numéricos del rendimiento total, que se muestran a continuación en la tabla 5.

En dicha tabla se puede observar, que al igual que para el azul, el rendimiento de los filtros digitales es mayor que el de los filtros ópticos, aún así, el rendimiento de ambos filtros en todo el rango de emisión de los dispositivos es muy bajo en relación con el η_{rb} , a excepción del rendimiento del filtro digital del ordenador portátil ASUS. Este dispositivo, es el único que consigue reducir más del 25% la radiación, de hecho, cuando el filtro de este dispositivo se encuentra en el nivel máximo, se consigue una reducción del 80% de la radiación total que emite el portátil. Si observamos la variación del espectro de este dispositivo en función del nivel de filtro digital en la figura 17, podemos ver que en la zona del rojo consigue reducir bastante la emisión, si ahora nos fijamos en la zona del azul y del verde podemos ver que la bajada del espectro es bastante mayor, llegando a reducir casi la totalidad de la emisión a partes iguales en ambas zonas. Si miramos las figuras 15, 16 y 18, vemos que los filtros digitales de estos dispositivos actúan prácticamente solo en el azul, lo mismo ocurre si observamos las gráficas de los filtros ópticos de estas cuatro figuras. Esto explicaría que el rendimiento total del ordenador portátil sea tan alto, mientras que en el caso de los demás dispositivos, con el nivel máximo, el rendimiento es inferior al 25%.

Tabla 5. Rendimiento de reducción de la radiación total(η_t) de los filtros digitales y de los filtros ópticos para cada uno de los dispositivos.

| η total | Móvil VIVO | IPhone 14 | Portátil ASUS | Tableta Huawei |
|----------------------|------------|-----------|---------------|----------------|
| Filtro 25% | 0,02 | 0,05 | 0,30 | 0,06 |
| Filtro 50% | 0,09 | 0,15 | 0,64 | 0,13 |
| Filtro 75% | 0,15 | 0,13 | 0,75 | 0,16 |
| Filtro 100% | 0,22 | 0,11 | 0,80 | 0,18 |
| Gafas Cysux | 0,02 | - | 0,11 | 0,08 |
| Gafas Graduadas | 0,07 | - | 0,11 | 0,06 |
| Gafas Alain Afflelou | 0,06 | - | 0,11 | 0,09 |
| Gafas para ordenador | 0,06 | - | 0,09 | 0,07 |
| Gafas TR90 | 0,13 | - | 0,17 | 0,14 |
| Gafas ATTCL | 0,09 | - | 0,10 | 0,08 |
| Gafas Contour | 0,01 | - | 0,12 | 0,10 |
| Gafas Horus X | 0,16 | - | 0,20 | 0,16 |
| Gafas Reading | 0,02 | - | 0,13 | 0,10 |
| Filtro Reticare | - | 0,14 | - | - |

6.4. Otras medidas

La iluminación (E) emitida por los dispositivos no es un parámetro constante, sino que depende de las condiciones de trabajo en las que se tomen las medidas. En este apartado, se muestra la variación de la iluminación en función de la distancia, el nivel de filtro digital y el brillo de la pantalla de los dispositivos. En todos los casos las luces del laboratorio permanecieron apagadas.

a) Iluminación en función de la distancia

La iluminación en función de la distancia se obtuvo para un brillo de pantalla máximo y sin ningún tipo de filtro. Estas condiciones fueron constantes en todas las medidas, mientras íbamos situando los dispositivos a distintas distancias de la fibra. El error de la iluminación viene dado por el error del luxómetro que, a su vez, depende de las medidas, para valores de iluminación menores de 20 lux el error es de 0,2 lux, para valores entre 20lux y 100lux corresponde un error de 1lux, y para valores mayores de 100lux el error sería de 2lux.

En la figura 19, podemos ver la variación de la iluminación en función de la distancia para cada uno de los dispositivos. En el caso del móvil VIVO y del iPhone 14, medimos la iluminación a seis distancias diferentes, mientras que con el ordenador portátil y con la tableta tomamos la iluminación a ocho distancias diferentes. Como cabía esperar, la iluminación disminuye de forma exponencial, conforme aumenta la distancia.

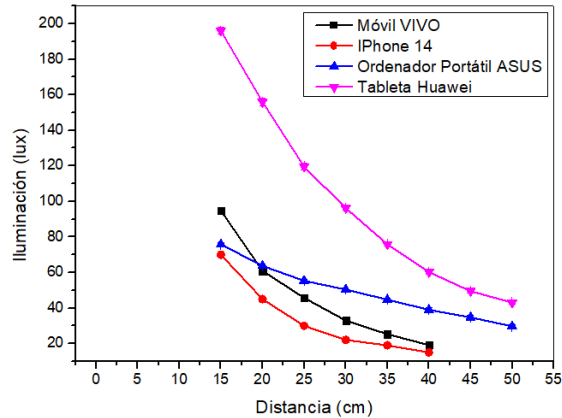


Figura 19. Variación de la iluminación en función de la distancia para cada uno de los dispositivos.

b) Iluminación en función del brillo de la pantalla

Para medir la iluminación en función del brillo de la pantalla, la distancia y el nivel de filtro digital fueron constantes. Cada dispositivo se mantuvo a una distancia que hemos denominado como distancia normal de uso, tal y como hemos explicado en la sección 5 (página 18), y con el filtro digital desactivado. Medimos la iluminación para cinco niveles de brillo: 0, 25%, 50%, 75%, 100%. Al variar el nivel de brillo manualmente, el error que le atribuimos es igual al 2%. En la figura 20, se puede observar que a medida que el nivel de brillo va aumentando, aumenta la iluminación.

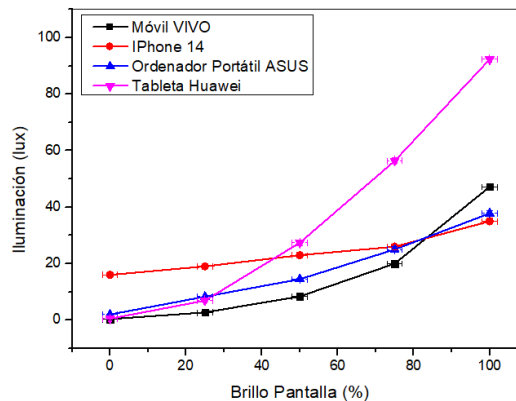


Figura 20. Variación de la iluminación en función del nivel de brillo de la pantalla de los dispositivos.

c) Iluminación en función del nivel de filtro digital.

Manteniendo cada dispositivo a su distancia normal de uso y con un brillo de pantalla máximo, variamos el nivel de filtro digital pasando por cinco niveles: 0, 25%, 50%, 75% y 100%, asumiendo un error del 2%. En la figura 21, se puede observar que, en todos los dispositivos, la iluminación disminuye si aumentamos el nivel del filtro digital.

Los filtros digitales de los dispositivos que hemos utilizado pueden variar de forma discontinua, en pasos de 25%, como es el caso del filtro incorporado en el ordenador portátil, o de forma continua, como en el resto de dispositivos. Para todos los dispositivos, el nivel de filtro varía en un rango que va de 0 a 100%.

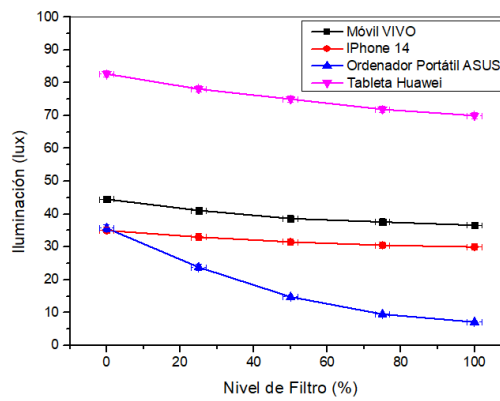


Figura 21. Variación de la iluminación en función del nivel de filtro digital para cada uno de los dispositivos.

6.5. Iluminación circadiana (CIL)

Para analizar la iluminación circadiana, primero mostraremos como varía en función de la distancia y, en el segundo apartado, se presentan los resultados de iluminación circadiana obtenidos para cada dispositivo en función de los dos tipos de filtros con los que hemos trabajado en este estudio.

a) CIL en función de la distancia

Según la ecuación 5 (página 11), CIL depende directamente de la iluminación. Acabamos de ver, que, si la distancia aumenta, la iluminación disminuye, por lo tanto, la iluminación circadiana seguirá la misma trayectoria, tal y como se puede observar en la figura 22.

Para el cálculo de CIL en función de la distancia, utilizamos las medidas de iluminación tomadas en el apartado 6.4. de este trabajo.

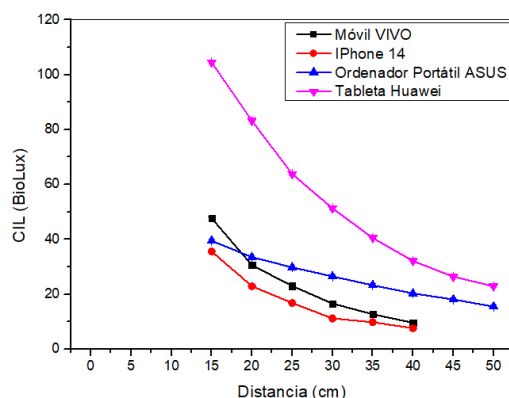


Figura 22. Variación de la iluminación circadiana en función de la distancia para cada uno de los dispositivos.

b) CIL de cada dispositivo

En este apartado, se presentan los valores de iluminación circadiana calculados, siguiendo los pasos descritos en el apartado 3, para todos los dispositivos sin filtros, con los filtros digitales y con los filtros ópticos. Para realizar el cálculo del CIL, la iluminación fue medida a la distancia normal de uso de cada uno de los dispositivos. En las tablas 6, 7, 8 y 9, se muestran los resultados del rendimiento circadiano (CER), el rendimiento luminoso (LER), la iluminación (E) en lux, el factor de acción circadiana y, por último, la iluminación circadiana (CIL) en biolux.

Tabla 6. Parámetros circadianos (CIL) para el móvil VIVO sin filtro, con los filtros digitales y con los filtros ópticos.

| | CER (blm/w) | LER (lm/w) | CAF (lm/blm) | E (lux) | CIL (blx) |
|----------------------|----------------|---------------|-----------------|------------|--------------|
| Sin Filtro | 193,03 | 383,62 | 0,50 | 46±1 | 23,0±0,5 |
| Filtro 25% | 182,87 | 387,04 | 0,47 | 41±1 | 19,4±0,5 |
| Filtro 50% | 167,49 | 391,60 | 0,43 | 39±1 | 16,7±0,4 |
| Filtro 75% | 154,08 | 395,77 | 0,39 | 37±1 | 14,4±0,4 |
| Filtro 100% | 134,24 | 401,16 | 0,33 | 37±1 | 12,4±0,3 |
| Gafas Graduadas | 194,43 | 380,48 | 0,51 | 41±1 | 21,0±0,5 |
| Gafas Alain Afflelou | 187,34 | 386,63 | 0,48 | 43±1 | 20,7±0,5 |
| Gafas Cysux | 192,17 | 382,00 | 0,50 | 41±1 | 20,8±0,5 |
| Gafas para ordenador | 181,45 | 389,23 | 0,47 | 43±1 | 20,2±0,5 |
| Gafas ATTCL | 178,02 | 389,01 | 0,46 | 42±1 | 19,3±0,5 |
| Gafas TR90 | 185,48 | 386,00 | 0,48 | 40±1 | 19,2±0,5 |
| Gafas Horus X | 177,13 | 388,21 | 0,47 | 39±1 | 18,3±0,5 |
| Gafas Contour | 178,35 | 389,95 | 0,46 | 38±1 | 17,5±0,5 |
| Gafas Reading | 171,93 | 397,36 | 0,43 | 39±1 | 16,8±0,4 |

Tabla 7. *Parámetros circadianos (CIL) para el iPhone 14 sin filtro, con los filtros digitales y con los filtros ópticos.*

| | CER (blm/w) | LER (lm/w) | CAF (lm/blm) | E (lux) | CIL (blx) |
|------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------|----------------------|
| Sin Filtro | 184,42 | 362,46 | 0,51 | 35±1 | 17,9±0,5 |
| Filtro 25% | 163,48 | 370,76 | 0,44 | 34±1 | 15,0±0,4 |
| Filtro 50% | 144,85 | 373,20 | 0,39 | 33±1 | 12,9±0,4 |
| Filtro 75% | 120,51 | 367,08 | 0,33 | 31±1 | 10,2±0,3 |
| Filtro 100% | 96,12 | 357,63 | 0,27 | 30±1 | 8,1±0,3 |
| Filtro Reticare | 166,85 | 376,45 | 0,44 | 34±1 | 15,0±0,4 |

Tabla 8. *Parámetros circadianos (CIL) para el ordenador portátil ASUS sin filtro, con los filtros digitales y con los filtros ópticos.*

| | CER (blm/w) | LER (lm/w) | CAF (lm/blm) | E (lux) | CIL (blx) |
|-----------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------|----------------------|
| Sin Filtro | 215,71 | 413,91 | 0,52 | 39±1 | 20,3±0,5 |
| Filtro 25% | 197,10 | 400,09 | 0,49 | 24±1 | 11,8±0,5 |
| Filtro 50% | 144,35 | 412,95 | 0,35 | 14,8±0,2 | 5,18±0,07 |
| Filtro 75% | 70,45 | 398,61 | 0,18 | 9,5±0,2 | 1,71±0,04 |
| Filtro 100% | 38,55 | 341,35 | 0,11 | 7,1±0,2 | 0,78±0,02 |
| Gafas Graduadas | 218,99 | 411,03 | 0,53 | 33±1 | 17,5±0,5 |
| Gafas Alain Afflelou | 210,29 | 418,43 | 0,50 | 34±1 | 17,0±0,5 |
| Gafas Cysux | 217,63 | 413,56 | 0,53 | 32±1 | 17,0±0,5 |
| Gafas para ordenador | 202,05 | 424,13 | 0,48 | 34±1 | 16,3±0,5 |
| Gafas TR90 | 213,31 | 418,38 | 0,51 | 32±1 | 16,3±0,5 |
| Gafas ATTCL | 199,39 | 425,65 | 0,47 | 33±1 | 15,5±0,5 |
| Gafas Contour | 193,23 | 429,56 | 0,45 | 34±1 | 15,3±0,5 |
| Gafas Reading | 191,23 | 435,92 | 0,44 | 34±1 | 15,0±0,4 |
| Gafas Horus X | 201,65 | 425,04 | 0,47 | 31±1 | 14,6±0,5 |

Tabla 9. *Parámetros circadianos (CIL) para la tableta Huawei sin filtro, con los filtros digitales y con los filtros ópticos.*

| | CER (blm/w) | LER (lm/w) | CAF (lm/blm) | E (lux) | CIL (blx) |
|-----------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------|----------------------|
| Sin Filtro | 201,76 | 378,38 | 0,53 | 96±1 | 50,9±0,5 |
| Filtro 25% | 178,99 | 387,50 | 0,46 | 86±1 | 39,5±0,5 |
| Filtro 50% | 154,28 | 400,94 | 0,38 | 82±1 | 31,0±0,4 |
| Filtro 75% | 138,42 | 404,16 | 0,34 | 77±1 | 26,2±0,3 |
| Filtro 100% | 135,26 | 403,37 | 0,34 | 74±1 | 25,2±0,3 |
| Gafas Graduadas | 192,02 | 377,64 | 0,51 | 91±1 | 46,4±0,5 |
| Gafas Cysux | 201,40 | 374,45 | 0,54 | 85±1 | 45,9±0,5 |
| Gafas Alain Afflelou | 199,22 | 381,04 | 0,52 | 87±1 | 45,2±0,5 |
| Gafas para ordenador | 190,13 | 383,42 | 0,50 | 88±1 | 44,0±0,5 |
| Gafas TR90 | 197,16 | 378,97 | 0,52 | 83±1 | 43,2±0,5 |
| Gafas ATTCL | 186,92 | 384,10 | 0,49 | 87±1 | 42,6±0,5 |
| Gafas Contour | 183,77 | 383,70 | 0,48 | 86±1 | 41,3±0,5 |
| Gafas Horus X | 191,64 | 379,59 | 0,50 | 81±1 | 40,5±0,5 |
| Gafas Reading | 179,56 | 390,26 | 0,46 | 88±1 | 40,5±0,5 |

6.6. Índice de supresión de melatonina: MSI

Para valorar cuantitativamente el índice de supresión de melatonina hemos necesitados los espectros de los dispositivos sin filtro, con los filtros digitales y con los filtros ópticos; la función de sensibilidad circadiana $C(\lambda)$ del modelo Gall¹¹ y el espectro solar con la normativa CIE-D65. Con estos espectros, y siguiendo la ecuación 6 (página 12), podemos calcular el MSI. En la tabla 10, se muestran los resultados del MSI en función de los filtros digitales y de los filtros ópticos.

Como se puede observar en dicha tabla, los dispositivos presentan un MSI muy bajo frente al MSI del sol.

Tabla 10. *Índice de supresión de melatonina para los cuatro dispositivos estudiados sin filtro, con el filtro digital y con los filtros ópticos. El error estimado de este parámetro es inferior al 1%.*

| MSI | Móvil VIVO | IPhone 14 | Portátil ASUS | Tableta Huawei |
|-----------------------------|-------------------|------------------|----------------------|-----------------------|
| Sin Filtro | 0,110 | 0,220 | 0,363 | 0,131 |
| Filtro 25% | 0,102 | 0,185 | 0,232 | 0,109 |
| Filtro 50% | 0,087 | 0,147 | 0,088 | 0,088 |
| Filtro 75% | 0,077 | 0,125 | 0,029 | 0,075 |
| Filtro 100% | 0,060 | 0,103 | 0,012 | 0,072 |
| Gafas Cysux | 0,105 | - | 0,321 | 0,119 |
| Gafas Graduadas | 0,101 | - | 0,330 | 0,116 |
| Gafas Alain Afflelou | 0,098 | - | 0,311 | 0,117 |
| Gafas para ordenador | 0,095 | - | 0,309 | 0,113 |
| Gafas TR90 | 0,091 | - | 0,298 | 0,110 |
| Gafas ATTCL | 0,091 | - | 0,302 | 0,110 |
| Gafas Contour | 0,098 | - | 0,287 | 0,106 |
| Gafas Rosas | 0,094 | - | 0,279 | 0,104 |
| Gafas Horus X | 0,083 | - | 0,273 | 0,103 |
| Filtro Reticare | - | 0,171 | - | - |

7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

En primer lugar, vamos a analizar el rendimiento obtenido de los filtros digitales y de los filtros ópticos, con el fin de comparar el efecto de ambos y comprobar cual consigue mayor reducción de la radiación azul, y, por tanto, cual es más efectivo.

A continuación, haremos un análisis de la iluminación circadiana y del índice de supresión de melatonina de cada dispositivo, y veremos cómo afectan ambos filtros a estos parámetros y, por tanto, a la supresión de la melatonina.

- Análisis del rendimiento de reducción de la radiación azul: η_{rb}

El rendimiento de reducción de la radiación azul es un parámetro que hemos definido con el fin de comparar el efecto de los filtros digitales de los dispositivos con los filtros ópticos.

Si el rendimiento es cero, según la ecuación 1 (página 9), quiere decir que el área bajo la curva del espectro de la radiación emitida por el dispositivo sin filtro es igual al área de la distribución espectral del dispositivo con filtro, lo que significa que el filtro no reduce la radiación azul emitida por ese dispositivo, en otras palabras, no es efectivo. En la figura 23, se muestra el rendimiento total y el η_{rb} en la zona del azul en función del nivel de filtro para los cuatro dispositivos analizados.

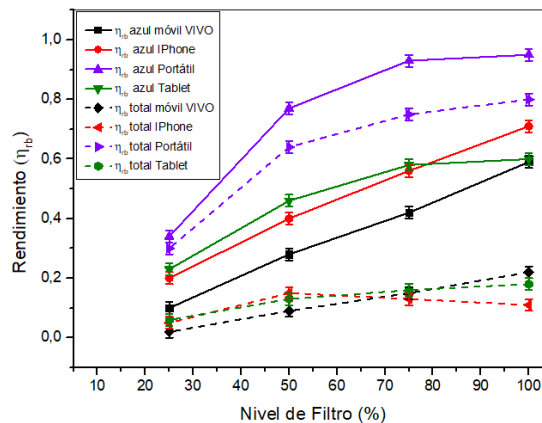


Figura 23. Rendimiento en el azul (línea continua) y rendimiento total (línea discontinua) en función del nivel de filtro digital de cada uno de los dispositivos.

Se puede observar, que el rendimiento total es muy bajo, a excepción del Portátil ASUS. Este dispositivo, presenta un filtro digital que actúa de manera efectiva en todo el espectro emitido, aun así, el rendimiento para las longitudes de onda corta es mayor.

En la tabla 4 se muestran los valores numéricos del rendimiento en la banda azul del espectro para cada dispositivo, con estos valores numéricos y con la gráfica de la figura 23, vamos a comparar los dispositivos entre ellos en función del rendimiento que poseen sus propios filtros.

Como cabía esperar, conforme aumenta el porcentaje de filtro, aumenta el rendimiento, puesto que, a mayor nivel filtro, mayor reducción de la luz azul. El ordenador portátil presenta el filtro más efectivo. Con el filtro al 75% y al 100%, se consigue un rendimiento del 93% y 95%, respectivamente. Esto significa, que el filtro que presenta el propio ordenador, por ejemplo, al 100%, reduce un 95% de la radiación azul emitida por él, es decir, consigue reducir la luz azul que llega al ojo humano casi en la totalidad. Si lo comparamos con el resto de los dispositivos, el ordenador portátil con un nivel de filtro del 50% consigue mayor reducción de la banda azul del espectro que el filtro digital de los demás dispositivos al máximo.

La tableta y el iPhone tienen valores de η_{rb} muy similares, el rendimiento del iPhone se mantiene siempre un poco por debajo, sin embargo, para el nivel de filtro máximo, se ve una clara diferencia entre ambos. Con el filtro al 100%, el iPhone reduce el 71% de la radiación azul que emite el móvil, mientras que la tableta reduce el 60% de la luz azul emitida por esta, que es prácticamente lo mismo que logra reducir el filtro del móvil VIVO al máximo. Para este dispositivo, se obtiene un rendimiento del 59% con el filtro al 100%, por lo que, presenta el filtro digital menos efectivo.

A continuación, vamos a estudiar el rendimiento de los filtros ópticos. Como para el iPhone 14 solo usamos el filtro Reticare, en la figura 24, se muestran tres gráficos de barras en lugar de cuatro, donde podemos ver el rendimiento en función de cada una de las gafas utilizadas.

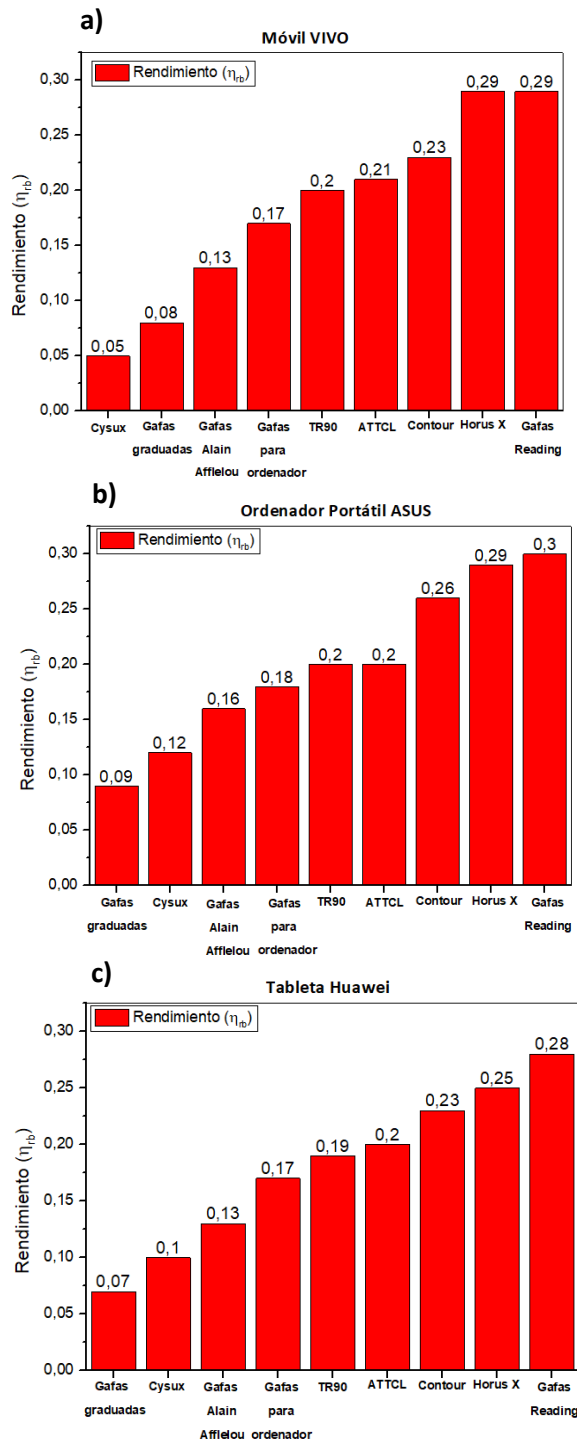


Figura 24. Rendimiento de los filtros ópticos montados en gafa para cada uno de los dispositivos, excepto para el iPhone 14. a) Móvil VIVO. b) Ordenador portátil ASUS. c) Tableta Huawei.

De los filtros ópticos, hay dos que destacan claramente sobre el resto, que se corresponden con los montados en las gafas Horus X y el de las gafas Reading, puesto que para todos los dispositivos consiguen el mayor rendimiento. En relación con el resto, el filtro óptico que presentan las gafas Contour también destaca, pero siempre por debajo de estas dos.

En el lado opuesto se encuentran los filtros ópticos de las gafas graduadas y las gafas Cysux que obtienen el menor rendimiento de reducción de la luz azul, en ninguno de los casos consiguen superar el 15%. Los filtros ópticos incorporados en las gafas de Alain Afflelou y las gafas para ordenador presentan un η_{rb} algo mayor que los dos últimos mencionados, pero siempre por debajo del 20%, mientras que los filtros de las gafas TR90 y las ATTCL sí que llegan a reducir el 20% de la radiación azul emitida.

Por un lado, hemos analizado el rendimiento de los filtros digitales, y por otro, el de los filtros ópticos; ahora vamos a poner en común ambos resultados para poder deducir el principal motivo de este trabajo: comprobar si son más efectivos los filtros digitales o los filtros ópticos-analógicos. Siguiendo los datos de la tabla 4 (página 26), vamos a realizar una comparación del η_{rb} de ambos filtros.

En el caso del móvil VIVO, como para el 25% del modo lectura el rendimiento es muy bajo, $\eta_{rb}=0,10$, todos los filtros ópticos montados en gafa consiguen mayor reducción de la luz azul excepto los de las gafas graduadas y las gafas Cysux. Para un nivel de filtro azul del dispositivo del 50%, teniendo en cuenta los errores, se obtiene el mismo rendimiento que con los filtros ópticos de las gafas Horus X y las gafas Reading, quedando el resto de las gafas por debajo. Los siguientes niveles del modo lectura, 75% y 100%, superan en rendimiento a todos los filtros ópticos. Con el modo lectura al máximo, se consigue un rendimiento de 0,59 duplicando así el valor obtenido por las gafas con los mejores filtros ($\eta_{rb}=0,29$).

Como hemos visto anteriormente, el filtro digital del ordenador filtra casi toda la luz azul que transmite. De hecho, con el modo lectura al 25% presenta un rendimiento de 0,34, consiguiendo mayor reducción de la luz azul que con cualquiera de los filtros ópticos. Con un rendimiento de 0,3, el filtro óptico de las gafas Reading es el que más consigue reducir la radiación azul que le llega al observador en comparación con el resto de filtros ópticos, aún así, este valor no es comparable con el rendimiento del filtro digital de este dispositivo a cualquier nivel.

En cuanto a la tableta, se encuentra en el punto medio entre el móvil y el ordenador. Si ponemos el modo lectura al 25%, el η_{rb} es de 0,23, en este caso, el filtro óptico de las gafas Reading, con un η_{rb} de 0,28, y las gafas Horus X, con un η_{rb} de 0,25, conseguirían una mayor reducción de la radiación azul, y el de las gafas Contour estaría a la misma altura que el filtro digital del dispositivo, pero al pasar al siguiente nivel del modo lectura, todos los filtros presentan un rendimiento menor.

El filtro óptico montado en las gafas Reading es el que mayor η_{rb} consigue, llegan a un valor de 0,28, pero, al igual que el móvil VIVO, con el filtro de la tableta al 100% se duplica esta cifra, puesto que para este nivel de filtro se obtiene un rendimiento de 0,60.

Por último, vamos a analizar el filtro para móviles de Reticare y a compararlo con el efecto del filtro digital del iPhone 14. Como se puede observar en la figura 25, Reticare solo supera al filtro del móvil cuando este está al 25%. A partir del 50%, el filtro digital del móvil reduce más la luz azul. Para este nivel de modo lectura, presenta un rendimiento de 0,4, mientras que el rendimiento del filtro Reticare es igual a 0,32.

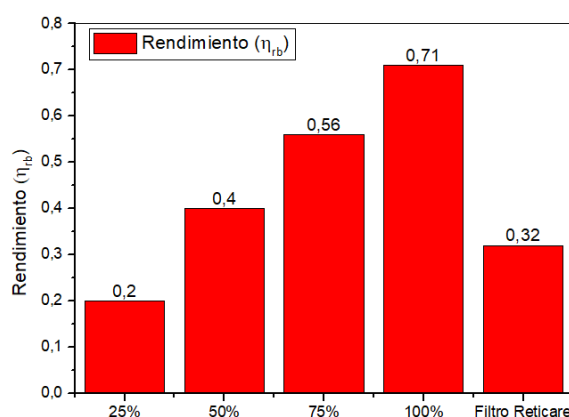


Figura 25. Rendimiento de reducción de la radiación azul para el iPhone 14 en función del filtro digital y del filtro óptico Reticare.

- Iluminación circadiana (CIL)

La iluminación circadiana (CIL), según hemos visto en la ecuación 5, depende del factor de acción circadiana (CAF) y la iluminación (E). El factor de acción circadiana representa el porcentaje de la iluminación emitida por los dispositivos que activa las células ganglionares. Es decir, si un dispositivo presenta un CAF de 0,5 y una iluminación de 50 lux; de esos 50 lux, 25 lux afectaran a las células ganglionares.

Por lo tanto, podemos definir la iluminación circadiana como la cantidad de iluminación que le llega al ojo, por parte de los dispositivos, que activa las células ganglionares y, por tanto, afecta a la supresión de melatonina.

Como el CIL es directamente proporcional a CAF y a la iluminación, si aumenta alguno de estos dos factores, de igual modo lo hará el CIL. A mayor CIL, mayor supresión de melatonina.

Vamos a empezar comparando el CIL de los cuatro dispositivos. Para poder compararlos, necesitamos que la iluminación se haya medido a la misma distancia para todos los aparatos, puesto que, como ya sabemos, la iluminación es un parámetro que depende de la distancia. Si E varía con la distancia, significa que el CIL también depende de ella. Por lo tanto, la tabla 11, se muestra el CIL de cada dispositivo a una distancia de 25 cm.

Tabla 11. *Iluminación circadiana de cada dispositivo para una distancia de 25 cm.*

| | Móvil VIVO | IPhone 14 | Portátil AUS | Tableta Huawei |
|---------------------|-------------------|------------------|---------------------|-----------------------|
| CAF (lm/blm) | 0,50 | 0,51 | 0,52 | 0,53 |
| E (lux) | 46±1 | 35±1 | 61±1 | 119,6±2 |
| CIL (blx) | 23,0±0,5 | 17,9±0,5 | 31,7±0,5 | 63±1 |

El CAF de los cuatro dispositivos es muy similar, la iluminación que emite cada uno con el brillo de pantalla al máximo va a ser lo que haga que presenten mayor o menor CIL, y que, por tanto, afecten más o menos al ritmo circadiano. Como se puede observar la tableta Huawei presenta el mayor valor de iluminación circadiana, superando los 47 blx, lo que supondrá una supresión de melatonina del 13,5% aproximadamente. El resto de los dispositivos, tienen un CIL por debajo de 47 blx, como hemos visto en la figura 6, hasta ese valor apenas hay supresión de melatonina.

No obstante, 25cm es una distancia muy cercana para usar una tableta de estas dimensiones, lo normal es usarla a 30 cm o más. Para una distancia normal de uso, hemos visto que presenta un CIL de 50,9 blx, lo que se traduce en un 10,8%, aproximadamente, de supresión de melatonina.

En segundo lugar, analizaremos como afecta el modo lectura a la iluminación circadiana emitida por los dispositivos, en la figura 26, podemos ver una comparación gráfica. Y después, lo compararemos con el efecto de los filtros ópticos en la iluminación circadiana.

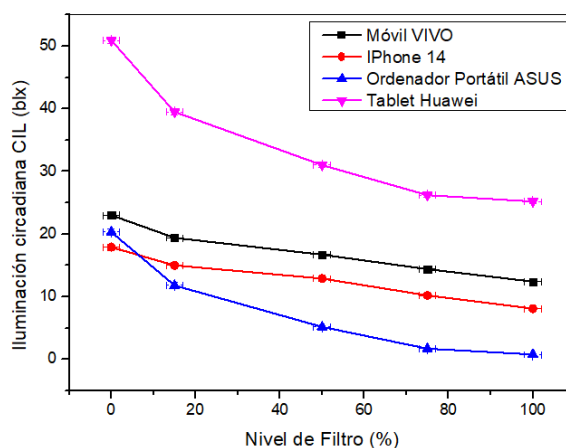


Figura 26. Variación de la iluminación circadiana en función del nivel del filtro digital para cada uno de los dispositivos.

En todos los dispositivos, conforme aumenta el nivel de filtro, disminuye la iluminación circadiana. Vamos a ver, en la tabla 12, que porcentaje de reducción de CIL presenta el filtro digital al 100% de cada uno de los dispositivos.

Tabla 12. Porcentaje de reducción de CIL con el filtro digital al nivel máximo de cada uno de los dispositivos estudiados a su distancia normal de uso.

| | Móvil VIVO | iPhone 14 | Portátil ASUS | Tableta Huawei |
|----------------------|------------|-----------|---------------|----------------|
| Reducción CIL | 46,09% | 54,75% | 99,96% | 50,49% |

Con el filtro al máximo, el portátil es el que mayor reducción del CIL consigue. Los filtros de los otros tres dispositivos presentan un porcentaje de reducción de CIL sobre el 50%, el modo lectura del móvil VIVO sería el que menos reduce el CIL, mientras que para la tableta y el iPhone podemos decir que lo reduce a más de la mitad.

A continuación, con ayuda de la Tabla 13, vamos a comparar el CIL de los filtros digitales con el de los filtros ópticos analógicos.

Tabla 13. *Iluminación circadiana de cada uno de los dispositivos sin filtro, con los filtros digitales y con los filtros ópticos-analógicos.*

| CIL (blx) | Móvil VIVO | iPhone 14 | Portátil ASUS | Tableta Huawei |
|-----------------------------|------------|-----------|---------------|----------------|
| Sin Filtro | 23,0±0,5 | 17,9±0,5 | 20,3±0,5 | 50,9±0,5 |
| Filtro 25% | 19,4±0,5 | 15,0±0,4 | 11,8±0,5 | 39,5±0,5 |
| Filtro 50% | 16,7±0,4 | 12,9±0,4 | 5,18±0,07 | 31,0±0,4 |
| Filtro 75% | 14,4±0,4 | 10,2±0,3 | 1,71±0,04 | 26,2±0,3 |
| Filtro 100% | 12,4±0,3 | 8,1±0,3 | 0,78±0,02 | 25,2±0,3 |
| Gafas graduadas | 21,0±0,5 | - | 17,5±0,5 | 46,4±0,5 |
| Gafas Alain Afflelou | 20,7±0,5 | - | 17,0±0,5 | 45,2±0,5 |
| Gafas Cysux | 20,8±0,5 | - | 17,0±0,5 | 45,9±0,5 |
| Gafas para ordenador | 20,2±0,5 | - | 16,3±0,5 | 44,0±0,5 |
| Gafas ATTCL | 19,3±0,5 | - | 15,5±0,5 | 42,6±0,5 |
| Gafas TR90 | 19,2±0,5 | - | 16,3±0,5 | 43,2±0,5 |
| Gafas Horus X | 18,3±0,5 | - | 14,6±0,5 | 40,5±0,5 |
| Gafas Contour | 17,5±0,5 | - | 15,3±0,5 | 41,3±0,5 |
| Gafas Reading | 16,8±0,5 | - | 15,0±0,4 | 40,5±0,5 |
| Filtro Reticare | - | 15,0±0,4 | - | - |

En todos los casos el filtro digital reduce más la iluminación circadiana que los filtros ópticos. En el caso del ordenador portátil ASUS y de la tableta Huawei, con el filtro digital al 25% se consigue un CIL más bajo que con cualquiera de los filtros ópticos. Aunque, cabe señalar, que cualquiera de los filtros, tanto digitales como ópticos, reducen el CIL de la tableta por debajo de los 47 blx, punto clave para la supresión de melatonina.

En la tabla 13, hemos visto que el filtro digital del móvil VIVO era el menos efectivo a la hora de reducir la iluminación circadiana, por ello, en este caso se necesita mayor nivel de filtro digital para superar el efecto de los filtros ópticos. Con el modo lectura al 50%, se consigue un CIL de 16,7, el mismo valor que presenta el filtro óptico de las gafas Reading (filtro óptico que más reduce), es a partir del 75% de filtro digital cuando se consigue mayor reducción de la iluminación circadiana que con cualquiera de los filtros ópticos.

Para el iPhone, el CIL que se alcanza con el modo lectura al 25% es el mismo que el del Filtro Reticare (CIL=15), pero, a partir de un nivel de filtro digital del 50%, se obtienen mejores resultados con el filtro que presenta el software de este smartphone.

En cuanto a los filtros ópticos, al igual que en el rendimiento, no todos son igual de eficaces. Los filtros que alcanzan una mayor reducción de CIL son los que llevan incorporados las gafas Horus X, Contour y Reading; teniendo en cuenta los errores, los tres presentan el mismo CIL. Las gafas graduadas junto con las gafas Cysux y gafas para ordenador, presentan los peores filtros ópticos.

- **Índice de supresión de melatonina (MSI)**

El índice de supresión de melatonina MSI, es otro parámetro que nos permite analizar como afecta cada dispositivo a la supresión de melatonina. En este caso, no se tiene en cuenta la iluminación, por lo que el MSI solo va a depender de la radiación que emita cada dispositivo en el rango del azul.

A la hora de analizar el MSI, hay que tener en cuenta que comparamos el efecto de los dispositivos con el sol, teniendo siempre presente que el sol suprime al 100% la secreción de melatonina y, por tanto, presenta un $MSI=1$. En la tabla 14, se muestran los valores de MSI de los dispositivos en relación al del sol.

Tabla 14. *Resultados del índice de supresión de melatonina MSI de los cuatro dispositivos sin filtro en relación con el MSI del sol con un error estimado inferior al 1%.*

| | MSI |
|--------------------------------|------------|
| Sol | 1 |
| Móvil VIVO y72 | 0,11 |
| IPhone 14 Pro | 0,22 |
| Ordenador Portátil ASUS | 0,36 |
| Tablet Huawei | 0,13 |

Para poder comparar estos resultados con los espectros de los dispositivos, necesitamos aclarar unos conceptos. Como hemos visto antes, cada dispositivo tiene unos LED con un máximo de emisión en las zonas del azul, verde y rojo. Cuanto mayor sea la emisión en la banda espectral del azul con respecto a las otras dos zonas, mayor MSI.

Nos vamos a fijar en el espectro de la tableta Huawei y en el del ordenador portátil ASUS de la figura 27 donde aparecen la distribución espectral de los cuatro dispositivos medida a 25 cm. Podemos observar como la emisión en el azul de la tableta queda por encima de la del portátil, pero si comparamos la radicaicón emitida en el azul respecto a lo que emite en el verde y en el rojo de ambos dispositivos, podemos ver que el máximo

de emisión del portátil se encuentra en el azul, mientras que la tableta emite más en el verde y en el rojo. La tableta presenta mayor iluminación que el portátil y, por tanto, más intensidad, esto explica que el espectro de la tableta por encima del espectro del portátil, pero ya hemos dicho antes que el MSI no depende de la iluminación sino de cuanta radiación azul emita el dispositivo. Por ello, el portátil es el dispositivo con mayor MSI.

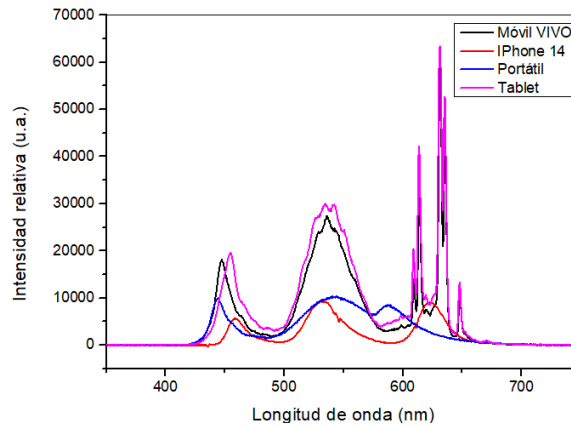


Figura 27. *Distribución espectral de los dispositivos para una distancia de 25 cm.*

De hecho, si normalizamos los espectros al máximo de emisión de cada uno de ellos, figura 28, se puede ver claramente la proporción de radiación azul de cada uno de los dispositivos.

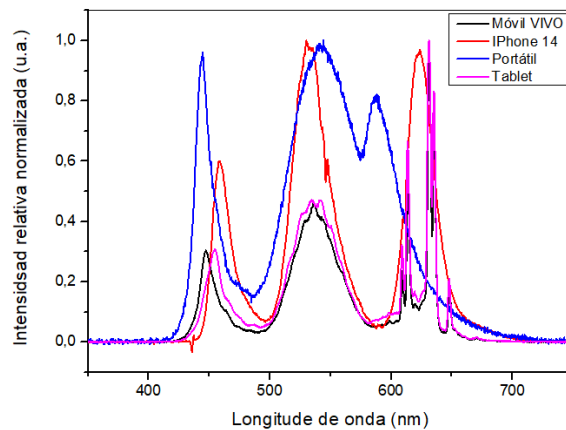


Figura 28. *Espectros de los dispositivos sin filtro para una distancia de 25cm normalizados al máximo de emisión de cada uno de ellos.*

Con todo esto, podemos decir que el MSI no es un parámetro válido para determinar la supresión de melatonina de los humanos puesto que la iluminación influye en la radiación que le llega al ojo.

Ahora, vamos a ver cómo afectan los filtros digitales y los filtros ópticos al MSI. En la Tabla 15, se muestra el MSI para cada uno de estos filtros. En este caso, le atribuimos el 100% de supresión de melatonina al dispositivo sin filtro.

Tabla 15. *Índice de supresión de melatonina de los filtros digitales y de los filtros ópticos-analógicos en relación con el MSI del dispositivo sin filtro (asumiendo que en este caso el MSI del dispositivo sin filtro es igual a 1). El error estimado es inferior al 1%.*

| | Móvil VIVO | IPhone 14 | Portátil ASUS | Tableta Huawei |
|-----------------------------|-----------------------|------------------|--------------------------|---------------------------|
| Sin Filtro | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Filtro 25% | 0,91 | 0,84 | 0,64 | 0,83 |
| Filtro 50% | 0,79 | 0,67 | 0,24 | 0,67 |
| Filtro 75% | 0,70 | 0,57 | 0,08 | 0,58 |
| Filtro 100% | 0,55 | 0,47 | 0,04 | 0,55 |
| Gafas Cysux | 0,95 | - | 0,88 | 0,91 |
| Gafas Alain Afflelou | 0,89 | - | 0,86 | 0,89 |
| Gafas Graduadas | 0,92 | - | 0,91 | 0,89 |
| Gafas para ordenador | 0,86 | - | 0,85 | 0,86 |
| Gafas ATTCL | 0,83 | - | 0,83 | 0,84 |
| Gafas TR90 | 0,83 | - | 0,82 | 0,84 |
| Gafas Contour | 0,89 | - | 0,79 | 0,81 |
| Gafas Reading | 0,86 | - | 0,77 | 0,79 |
| Gafas Horus X | 0,75 | - | 0,75 | 0,77 |
| Filtro Reticare | - | 0,78 | - | - |

Al igual que pasaba con el rendimiento y con la iluminación circadiana, si lo comparamos con los demás dispositivos, el filtro digital del ordenador es el más efectivo. Además, si la comparación la hacemos con los filtros ópticos, siguen reduciendo más los filtros digitales.

El filtro del iPhone al máximo consigue reducir el MSI un poco más de la mitad (53%), mientras que el del Móvil VIVO y el de la tableta Huawei no llega al 50%. Aun así, los filtros digitales de estos dispositivos tienen mayor efecto que cualquiera de los filtros ópticos.

En el caso del iPhone y de la tableta, el filtro digital al 50% presenta un MSI más bajo que los filtros ópticos. Sin embargo, el filtro óptico de Reticare, en el caso del iPhone, y los filtros ópticos de las gafas Reading, gafas Horus X y gafas Contour, en el caso de la tableta, consiguen mayor reducción del índice de melatonina que el filtro digital al 25%.

Para el móvil VIVO, el filtro digital empieza a reducir más que los filtros ópticos a partir del 75%, con el modo lectura al 50% se consigue un MSI de 0,79, mientras que el filtro óptico de las gafas Horus X presenta un MSI de 0,75. El resto de los filtros ópticos, son menos eficaces que el filtro digital al 50%, pero más que al 25%, a excepción de los filtros ópticos montados en las gafas Cysux (MSI=0,95) y en las gafas graduadas (MSI=0,92), cuyo MSI esta por debajo del MSI que se obtiene con el modo lectura al 25% (MSI=0,91).

Si hacemos una comparación de los filtros ópticos, por lo general, todos presentan un MSI muy similar, si hacemos una aproximación dejando solo un decimal, podemos decir que todos los filtros muestran un MSI entre 0,9-0,8, es decir, que los filtros ópticos reducen, aproximadamente, el MSI en un 10%-20%. Aun así, destaca el filtro óptico montado en las gafas Horus X puesto que presentan el MSI más bajo. Por el contrario, los filtros ópticos de las gafas Cysux y las gafas graduadas, son las menos efectivos.

8. CONCLUSIONES

Tras realizar el análisis de los resultados, las conclusiones principales que obtenemos de este trabajo son las siguientes:

1. Tanto los filtros digitales que incorporan los dispositivos (modo lectura) como los filtros ópticos adaptados en gafa o acoplados a la pantalla del teléfono o el ordenador, están diseñados para reducir la radiación en la banda azul del espectro que llega a la pupila del observador. En menor medida también actúan sobre las bandas verde y roja del espectro de emisión
2. En todos los dispositivos, el rendimiento de atenuación de la radiación de los filtros digitales es superior al rendimiento de los diferentes filtros ópticos. Para la banda azul el rendimiento medio de los filtros digitales oscila entre un 22% y un 71% de reducción en función del nivel del modo lectura. Para los filtros ópticos el rendimiento medio no supera el 20% de reducción. Los dos sistemas de filtros son más efectivos en reducir la emisión de la banda azul del espectro.
3. De los cuatro dispositivos estudiados, el portátil ASUS presenta el filtro digital con mayor capacidad para reducir la radiación azul, mientras que el móvil VIVO presenta el filtro menos efectivo. El filtro digital de la tableta Huawei y del iPhone son muy similares. Los filtros ópticos montados en las Gafas Reading y en las gafas Horus X son los más efectivos, mientras que los filtros ópticos incorporados en las Gafas graduadas son los menos útiles.
4. Los filtros digitales y los filtros ópticos tienen un efecto positivo en la reducción de la iluminación circadiana (CIL). En ningún caso con la aplicación de los filtros se supera el nivel de iluminación que pueda afectar a la producción de melatonina. El ordenador portátil ASUS dispone del mejor filtro digital.
5. Los filtros digitales son más efectivos en la reducción del índice de supresión de la melatonina (MSI) que los filtros ópticos. Con el nivel máximo del modo lectura el índice de supresión de la melatonina se reduce más del 50% de su valor inicial. Los filtros ópticos reducen de media menos de un 20% del valor inicial. El más efectivo es el filtro digital del portátil ASUS, y en cuanto a los filtros ópticos los mejores son los de las gafas Horus X y el filtro Reticare

9. BIBLIOGRAFÍA

1. Yvan Touitou, Alain Reinberg, David Touitou. (2017). Association between light at night, melatonin secretion, sleep deprivation, and the internal clock: Health impacts and mechanisms of circadian disruption. *Life Sciences*, 173, 94-106.
2. Jorge a Calvo-Sanz & Carlos E Tapia-Ayuga. (2020). Blue light emission spectra of popular mobile devices: The extent of user protection against melatonin suppression by built-in screen technology and light filtering software systems. *Cronobiology International*, 37, 1016-1022.
3. Maurizio Rossi. (2021). From the Nobel prize for medicine to the future Lighting Design in interiors: when colour matters. *Journal of the International Colour Association*, 27, 1-8.
4. Mark S. Rea & Mariana G. Figueiro. (2013). A Working Threshold for Acute Nocturnal Melatonin Suppression from “White” Light Sources used in Architectural Applications. *Journal of Carcinogenesis & Mutagenesis*, 4(3).
5. Kathryn M. Orzech, Michael A. Grandner, Brandy M. Roanea, & Mary A. Carskadona. (2016). Digital media use in the 2 h before bedtime is associated with sleep variables in university students. *Comput Human Behavior*, 55(A), 43-50.
6. Jung-Yoon Heo, Kiwon Kim, Maurizio Fava, David Mischoulon, George I. Papakostas, Min-Ji Kim, Dong Jun Kim, Kyung-Ah Judy Chang, Yunhye Oh, Bum-Hee Yu, Hong Jin Jeon. (2017). Effects of smartphone use with and without blue light at night in healthy adults: A randomized, double-blind, cross-over, placebo-controlled comparison. *Journal of Psychiatric Research*, 87, 61-70.
7. Gianluca Tosini, Ian Ferguson, Kazuo Tsubota. (2016) Effects of blue light on the circadian system and eye physiology. *Molecular Vision*, 22, 61-72.

8. Downi Laura. (2017). Blue-light filtering ophthalmic lenses: to prescribe, or not to prescribe? *Ophthalmic & Physiological Optics*, 37, 640–643.
9. John G Lawrenson, Christopher C Hull & Laura E Downie. (2017). The effect of blue-light blocking spectacle lenses on visual performance, macular health and the sleep-wake cycle: a systematic review of the literature. *Ophthalmic Physiol Opt*, 37, 644–654.
10. Hai-Wei Chen, Jiun-Haw Lee, Bo-Yen Lin, Stanley Chen & Shin-Tson Wu. (2018). Liquid crystal display and organic light-emitting diode display: present status and future perspectives. *Science & Applications* 7, 17168.
11. Gall, D. (2002). Circadiane Lichtgrößen und deren meßtechnische Erfassung. *Licht*, 7(8), 860-871.
12. Brainard, G. C., Rollag, M. D., Hanifin, J. P., van den Beld, G., & Sanford, B. (2000). The effect of polarized versus nonpolarized light on melatonin regulation in humans. *Photochemistry and photobiology*, 71(6), 766-770.
13. Thapan, K., Arendt, J., & Skene, D. J. (2001). An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *The Journal of physiology*, 535(1), 261-267.
14. Martin Aube, Johanne Roby, Miroslav Kocifaj. (2013) Evaluating Potential Spectral Impacts of Various Artificial Lights on Melatonin Suppression, Photosynthesis, and Star Visibility. *PLoS ONE*, 8(7), e67798.