

---

# Evaluación del impacto retinal por luz azul en el día a día de los estudiantes

---

Adriana Isabel Girón Pozuelos





UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Evaluación del impacto retinal por luz azul en el día a día de  
los estudiantes**

Trabajo de graduación presentado por Adriana Isabel Girón Pozuelos  
para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Biomédica

Guatemala,

2025

Vo.Bo.:



(f)

Dr.-Ing. José Leal



(f)

M.Sc. Carlos Esquit Hernández

Desde los primeros años en la universidad, siempre me llamó la atención que una gran parte de mis compañeros y estudiantes utilizaban lentes graduados, estando en una edad saludable, es de esperar que estas personas no tengan problemas visuales. Conforme fue pasando el tiempo, me di cuenta que muchas personas utilizan sus dispositivos digitales a una distancia preocupante, e incluso con poca iluminación. Al llevar los primeros cursos de fisiología, me interesó evaluar el impacto que tiene la luz en los ojos, comencé con proyectos pequeños en los cursos de circuitos electrónicos, midiendo con componentes especiales el cambio de la luz a ciertas intensidades en términos de voltajes. Luego de un tiempo, comencé a preguntarme si había una relación entre el impacto de la luz azul y el daño ocular. Este proyecto representa la culminación de ese interés y el resultado de varios años de aprendizaje.

Quiero expresar mi agradecimiento a mis padres, por su apoyo durante estos años de estudio y por enseñarme a nunca rendirme, a luchar por mis sueños y a ser perseverante. Este último año fue difícil para mí, tuve que despedir a dos de las personas más importantes de mi vida, por ello quiero agradecer al Dr. Julio Pozuelos y a Lorena López, mis abuelos, por siempre haber estado en cada etapa de mi vida, cuidar de mi como padres, confiar en mis habilidades e impulsarme a seguir avanzado. Por último, expreso mi gratitud hacia mi hermana, quien fue el motor que me dio energía cuando las cosas no eran tan fáciles, por apoyarme en los momentos de tristeza y ser mi mejor amiga durante tanto años, pero sobre todo, por creer en mí.

Expreso un especial agradecimiento a mi asesor, el Dr. José Andrés Leal, por su constante acompañamiento, orientación, consejos y exigencia académica durante todo el desarrollo de este proyecto. Este trabajo representa no solo el cierre de una etapa académica, sino el inicio de una nueva fase profesional donde las ideas, el deseo de ayudar a las personas, la curiosidad constante por el funcionamiento de las cosas y la disciplina serán mis guías por el resto del camino.

<b>Prefacio</b>	<b>I</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>V</b>
<b>Lista de cuadros</b>	<b>VI</b>
<b>Resumen</b>	<b>VII</b>
<b>Abstract</b>	<b>VIII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes</b>	<b>2</b>
<b>3. Justificación</b>	<b>4</b>
<b>4. Objetivos</b>	<b>7</b>
4.1. Objetivo general . . . . .	7
4.2. Objetivos específicos . . . . .	7
<b>5. Alcance</b>	<b>8</b>
<b>6. Marco teórico</b>	<b>9</b>
6.1. El espectro electromagnético . . . . .	9
6.2. Luz azul . . . . .	10
6.3. Luz azul en dispositivos digitales . . . . .	11
6.4. Anatomía y funcionamiento del ojo humano, interacción con la luz . .	11
6.5. Procesamiento de la luz en la retina . . . . .	13
6.6. El ritmo circadiano . . . . .	15
6.7. Trastornos del sueño asociados al ritmo circadiano . . . . .	16
6.8. Influencia de la luz Azul en el sueño . . . . .	16
6.9. Lentes con filtro azul y antirreflejo . . . . .	17

6.10. Indicadores de riesgo por luz azul . . . . .	18
<b>7. Metodología</b>	<b>22</b>
7.1. Instrumentación y materiales . . . . .	22
7.2. Procedimiento de medición . . . . .	26
7.3. Procesamiento de señales . . . . .	27
<b>8. Resultados</b>	<b>29</b>
8.1. Calibraciones computadora . . . . .	29
8.2. Encuesta a estudiantes UVG . . . . .	34
8.3. Tiempo real . . . . .	40
<b>9. Discusión</b>	<b>46</b>
<b>10. Conclusiones</b>	<b>49</b>
<b>11. Recomendaciones</b>	<b>51</b>
<b>12. Bibliografía</b>	<b>53</b>
<b>13. Anexos</b>	<b>57</b>

---

## Lista de figuras

---

1.	Luz azul emitida por dispositivos y por el sol, percibida por los ojos humanos [19] . . . . .	11
2.	Anatomía y partes del ojo humano en corte longitudinal . . . . .	13
3.	Captura de la luz por la retina, diferentes longitudes de onda [20] . .	14
4.	El núcleo supraquiasmático, resaltado en rosado, se encuentra ubicado en el hipotálamo del cerebro humano. . . . .	15
5.	Toxicidad de la luz azul y su impacto potencial en la salud ocular y humana [20] . . . . .	19
6.	El RPF que designa el nivel de reducción de luz azul de alta energía en las pantallas digitales, métrica basada en investigaciones, verificada por terceros y respaldada por líderes en la comunidad del cuidado ocular [20]	21
7.	Sensor de color TCS34725 y diagrama de bloques del funcionamiento [32] . . . . .	23
8.	Esquemático de conexión de pines entre ESP32 y TCS34725 . . . . .	24
9.	Diagrama de ejemplo de colocación de distancias entre el sensor y dispositivo . . . . .	26
10.	Diagrama de flujo de adquisición de datos y análisis a través de los sistemas utilizados . . . . .	28
11.	Calibración de la computadora/monitor. Las figuras resaltadas en azul representan las mediciones con luces apagadas, y las resaltadas en amarillo representan las mediciones con luces encendidas . . . . .	30
12.	Calibración del iPhone XS . . . . .	32
13.	Calibración del televisor Samsung . . . . .	33
14.	Cantidad por facultades y carreras . . . . .	35
15.	Hábitos de uso de los encuestados . . . . .	36
16.	Uso de tipos de lentes y efectos visuales reportados durante el uso de pantallas digitales . . . . .	37
17.	Uso de dispositivos antes de dormir . . . . .	38
18.	Tiempo de uso antes de dormir . . . . .	38
19.	Empleo del modo nocturno ( <i>night shift</i> ) . . . . .	39

20.	Trastorno de sueño del ritmo circadiano en estudiantes universitarios	39
21.	Comparación entre escritura de documentos y visualización de videos	40
22.	Comparación entre el modo nocturno y el uso de lentes en Word para un brillo constante del 100 % . . . . .	41
23.	Comparación entre redes sociales . . . . .	42
24.	Aplicación Instagram Reels 100 % brillo en modo nocturno (izquierda) y uso de lentes (derecha) . . . . .	43
25.	Visualización de serie animada <i>One Piece</i> , 100 % de brillo . . . . .	44
26.	Visualización de serie animada <i>One Piece</i> , 100 % de brillo en modo nocturno . . . . .	45
27.	Ejemplo de calibración, computadora/monitor . . . . .	57
28.	Visualización de contenido audiovisual . . . . .	58
29.	Armado del prototipo . . . . .	58
30.	Toma durante experimentación . . . . .	59
31.	QR de encuesta realizada a estudiantes . . . . .	59

---

## Lista de cuadros

---

1.	Espectro electromagnético con frecuencia, longitud de onda y energía promedio del fotón [17] . . . . .	10
2.	Rangos de longitud de onda para diferentes colores dentro del espectro visible . . . . .	10
3.	Parámetros configurados por canal y sus características [32] . . . . .	24
4.	Distancias recomendadas para dispositivos electrónicos [33] [34] [35] .	25
5.	Distancias utilizadas en la experimentación de cada dispositivo . . . .	25
6.	Resumen de pruebas realizadas a los dispositivos con el sensor TCS32745	27

El uso de dispositivos electrónicos se ha integrado en la vida cotidiana, desde su aplicación en el aprendizaje hasta su implementación en entornos laborales. Gracias al avance de la tecnología, computadoras y teléfonos inteligentes realizan tareas de manera más eficiente que nunca. Aunque la tecnología ha mejorado muchos aspectos de la vida, desde la invención de la lámpara incandescente, la exposición a la luz artificial emitida por estos dispositivos ha generado preocupaciones sobre sus efectos en la salud humana. Especialmente, la luz azul, presente en todos los dispositivos electrónicos, ha sido objeto de estudio. Si bien no hay evidencia directa de que la luz azul cause daño o degeneración ocular, se ha demostrado que su exposición excesiva afecta el ritmo circadiano y el sueño, lo que puede tener un impacto negativo en la salud, especialmente entre los jóvenes y estudiantes.

Para este proyecto se implementó y calibró un sensor para medir la luz azul emitida por dispositivos digitales, optimizado para una longitud de onda específica y con filtrado de datos innecesarios. Se integró mediante un adaptador en lentes sin filtro ni graduación para obtener en tiempo real datos de exposición y posible impacto retinal. Para ello, se construyó un circuito digital con microcontrolador para la lectura y exportación de datos, se realizaron ajustes y calibraciones en un entorno controlado y se validó la precisión mediante procesamiento de señales. Además, se aplicó una encuesta a estudiantes universitarios sobre hábitos de uso de dispositivos (tiempo promedio, condiciones de iluminación y frecuencia), aportando información complementaria al estudio.

**Palabras clave:** luz azul, salud ocular, salud del sueño, análisis.

The use of electronic devices has become integrated into everyday life, from their application in learning to their implementation in work environments. Thanks to advances in technology, computers and smartphones perform tasks more efficiently than ever before. Although technology has improved many aspects of life since the invention of the incandescent light bulb, exposure to the artificial light emitted by these devices has raised concerns about its effects on human health. In particular, blue light, which is present in all electronic devices, has been the subject of study. While there is no direct evidence that blue light causes eye damage or degeneration, excessive exposure has been shown to affect circadian rhythm and sleep, which can have a negative impact on health, especially among young people and students.

For this project, a sensor was implemented and calibrated to measure the blue light emitted by digital devices, optimized for a specific wavelength and with filtering of unnecessary data. It was integrated via an adapter into lenses without filters or prescriptions to obtain real-time data on exposure and possible retinal impact. To do this, a digital circuit with a microcontroller was built for reading and exporting data, adjustments and calibrations were made in a controlled environment, and accuracy was validated through signal processing. In addition, a survey was conducted on university students about device-use habits (average time, lighting conditions, and frequency), providing complementary information for the study.

**Keywords:** blue light, eye health, sleep health, analysis.

# CAPÍTULO 1

---

## Introducción

---

Las investigaciones relacionadas con los efectos de la luz azul sobre el sistema ocular han identificado dos mecanismos principales de daño retinal: el fototérmico y el fotoquímico. Este tipo de lesión puede originarse por una exposición prolongada a fuentes de luz artificial intensas que presentan una elevada concentración de componentes en el espectro azul. Sin embargo, no existe evidencia científica sólida que valide la relación entre la exposición a la luz azul y el daño retinal. Este proyecto se centra en la implementación, calibración y validación de un sensor capaz de medir y cuantificar los niveles de luz azul emitida por dispositivos digitales en términos de irradiancia, con el objetivo de determinar el impacto potencial de esta longitud de onda específica sobre la salud ocular y del ritmo circadiano en estudiantes universitarios.

El sistema desarrollado basado en el sensor TCS32745 y un microcontrolador ESP32 permite obtener mediciones aproximadas de irradiancia del canal azul, realizando mediciones sobre distintos dispositivos digitales de uso cotidiano. Las mediciones se procesaron para generar gráficas de barras y de serie temporal que permitieron comparar la evolución de la irradiancia a lo largo de un determinado periodo de tiempo.

En el capítulo 2 se presentan los antecedentes de investigaciones previamente realizadas sobre el impacto retinal de la luz azul. En el capítulo 3 se presenta la justificación del proyecto. El capítulo 4 aborda los objetivos generales y específicos, seguido por el alcance del trabajo en el capítulo 5. En el capítulo 6 se detallan los fundamentos teóricos acerca de la luz azul, la anatomía del ojo humano, el procesamiento de la luz en la retina y entre otros aspectos importantes para el entendimiento de este proyecto. La metodología utilizada se describe en el capítulo 7, incluyendo los materiales necesarios, procedimientos de medición y herramientas utilizadas para la validación del sistema desarrollado. Los resultados del estudio y su discusión se presentan en los capítulos 8 y 9. Finalmente, el capítulo 10 aborda las conclusiones del trabajo, seguido del capítulo 11 donde se detallan las recomendaciones para un trabajo futuro.

A lo largo de los años, se han desarrollado métodos para medir y cuantificar las variaciones y espectros de luz, entre ellos se encuentra la espectrofotometría, radiancia espectral, y entre otros. La medida más conocida es el lumen o lúmenes (lm), que miden la cantidad de luz total de luz visible de una lámpara o fuente de luz, esto se obtiene a partir del uso de un luxómetro, dispositivo especializado en medir las condiciones de iluminación de un espacio interior, mide y presenta datos fotométricos de lámparas y luminarias, como lámparas LED. También se tiene el sistema de prueba de radiación óptica, se utiliza para la medición de la distribución de potencia espectral, radiancia, irradiación, exposición a la radiación, energía ultravioleta radiante, iluminancia, tamaño de la fuente aparente, temperatura de color, coordenadas de color, índice de reproducción cromática, y entre otros parámetros. Por otro lado, se tiene el goniómetro t1 para la medición de la distribución de la intensidad luminosa de lámparas y luminarias de dimensiones reducidas [1].

La luz puede clasificarse en mesópica y escotópica, en base a esto, se realizó la medición de la contribución de los bastones y conos a la percepción del color y el procesamiento temporal mesópico, mediante un método de fotoestimulación de los conos y bastones del ojo humano. Las metodologías desarrolladas para diferenciar la señalización de la retina externa se basan usualmente en diferencias funcionales conocidas entre los sistemas de conos y bastones. En uno de los métodos, las mediciones fueron obtenidas durante la adaptación a la oscuridad después de la exposición a una luz blanqueadora; durante la exposición solo los conos son sensibles y durante la adaptación a la oscuridad son más sensibles los conos. Se han utilizado mediciones foveales y parafoveales para comparar la función de conos y bastones porque los conos son la clase predominante de fotorreceptores en la fovea y los bastones son más frecuentes en la parafovea. Las diferentes sensibilidades espectrales de ambos sirven de base para aislar sus respuestas [2].

Algunos estudios han desarrollado métodos de medición del impacto que posee

la exposición a la luz azul en la visión, algunos han demostrado que la cantidad de células epiteliales se reducen tras la irradiación con luz azul. Otro estudio perseguía el objetivo de estudiar los cambios estructurales en el epitelio corneal humano in vitro tras irradiar células híbridas corneales humanas con LED de distintas longitudes de onda entre 410 y 850nm, a 5cm de distancia; la densidad celular se reducía al exponer la córnea a longitudes cercanas al azul. Llegando a la conclusión que, tras tres minutos de exposición a luz azul, tanto la viabilidad de las células corneales como de las conjuntivales se reducía, dañando el epitelio corneal humano in vitro. Se ha relacionado el daño fototóxico retiniano con la rodopsina, una proteína fotorreceptora que está implicada en la absorción de la luz y se considera que es la principal mediadora en la apoptosis de células de FR (fotorreceptores) y EPR (epitelio pigmentario) [3].

La luz azul, cuando es absorbida por la rodopsina, genera sustancias oxidantes que pueden dañar la retina, con consecuencias como la degradación de los lisosomas, atrofas del EPR e incrementando el efecto fototóxico [3]. El desarrollo de métodos preventivos contra los efectos de la luz azul por exposición vale la pena ser mencionado. Entre varios, el más utilizado son las gafas con filtro de luz azul o antirreflejo, ofrecen protección directa al usuario y disminuyen el daño ocular que pueda ser provocado por estrés fotoquímico [4]. Se ha demostrado, mediante estudios in vitro, que el filtrado de luz azul IOLS (lentes intraoculares) puede proteger de la luz azul inducida en la pigmentación de la retina y evitar la muerte de células epiteliales y reducir el factor de producción endotelial vascular [5]. En cuanto a la efectividad de los filtros azules en la reducción de daños retinianos, estos son implantados en LIOS y se demuestran resultados contradictorios; estudios realizados in vitro apuntan a que los filtros de luz azul reducen la apoptosis in vitro en un 80% sin embargo, la fuente utilizada superaba la longitud de onda emitida de los dispositivos electrónicos [3].

Finalmente, se han realizado avances para el desarrollo de lentes de contacto inteligentes como dispositivos oftalmológicos portátiles para el control de enfermedades y la gestión de salud, implementando y tomando en cuenta las causas de diversas patologías oculares y sin dejar de lado la exposición prolongada a dispositivos electrónicos digitales [6]. Se encontró una amplia gama de factores a considerar para su desarrollo, no obstante, se considera un proyecto de alta viabilidad para la gestión personalizada de enfermedades [7]. Aunque las investigaciones sobre la retina y su relación con la luz artificial aún siguen su curso, se puede comenzar a implementar soluciones óptimas y sencillas para prevenir sus efectos, como el desgaste ocular o la pérdida de la visión a edades tempranas.

Las pantallas digitales y la iluminación LED en interiores emiten una mayor cantidad de luz azul que las tradicionales bombillas incandescentes o halógenas [8]. Para comenzar a comprender el daño a la retina, o los ojos en general, que es causado por la exposición y mal uso de dispositivos electrónicos digitales, se debe conocer el tipo de luz que emiten estos mismos. Los dispositivos electrónicos digitales están compuestos por diversas partes, una fundamental es la pantalla LCD, estas pantallas emiten un tipo de luz específico que nos permiten visualizar su contenido. Sin embargo, los efectos a largo plazo de su exposición constante han causado, cada vez más, patologías y daños irreversibles a la vista. Esta luz emitida se le conoce como luz azul artificial. El ojo humano responde a esta luz a través los conos y desde los ganglios retinales fotosensibles. En el extremo de alta energía de fotones del espectro visible, la luz azul presenta un mayor riesgo de daño que otras longitudes de onda de la luz visible, este riesgo se le conoce usualmente como el riesgo de la luz azul [9].

Está bien establecido que la exposición a la luz azul visible puede causar daño fotoquímico a la retina y al epitelio pigmentario de la retina bajo ciertas condiciones [9], causando daños a largo plazo. En Guatemala, la jefa de la Clínica de Oftalmología Pediátrica de la Unidad Nacional de Oftalmología señala que el uso de los dispositivos electrónicos trajo deterioro en la visión de los niños que pasaron conectados más del tiempo recomendado. La miopía es uno de los problemas y aumentó en un 50 % las consultas pediátricas. ¿A cuánto asciende este incremento de casos? Datos en Guatemala no hay, pero a nivel mundial si hay una estadística del doble, 2.5 % era lo que se veía antes, ahora es el doble de miopía. Es una situación preocupante que, a largo plazo, puede causar muchos problemas, ya que no se trata solo de usar lentes. Si no se atiende, el niño tiene mayor riesgo de desprendimiento de retina, cataratas, estrabismo y otras complicaciones que pueden provocar discapacidad visual [10].

Cuando los fotorreceptores de la retina se exponen a la luz azul emitida por la tecnología LED (diodo emisor de luz), pueden producirse alteraciones en sus procesos

de crecimiento y regeneración. Esta exposición favorece la degradación celular y aumenta la producción de sustancias oxidantes, las cuales pueden superar la capacidad antioxidante natural del tejido. Por ello, la luz azul puede considerarse fototóxica [11], ya que contribuye al deterioro funcional de las células del epitelio pigmentario de la retina (EPR) y de los propios fotorreceptores. Por otra parte, el uso prolongado de dispositivos electrónicos puede provocar el denominado Síndrome Visual Informático (SVI), definido como un conjunto de alteraciones oculares y visuales asociadas al trabajo de cerca durante el uso del computador. Entre sus manifestaciones más frecuentes se encuentran el enrojecimiento ocular, ardor, prurito, visión borrosa, cefalea y sensación de pesadez palpebral, entre otros síntomas [12].

Diversos estudios han señalado que los efectos negativos de la luz azul se deben principalmente a tres factores: la exposición prolongada, el impacto acumulativo derivado de su uso diario y la proximidad a las pantallas en entornos que no son óptimos para la visión. En este sentido, algunas investigaciones han analizado el efecto de las longitudes de onda cortas sobre el sueño y el rendimiento, y han reportado alteraciones significativas en el ciclo circadiano, la arquitectura del sueño nocturno, los niveles de melatonina y cortisol, así como en las fases del sueño y otras mediciones obtenidas mediante una polisomnografía completa [13]. Asimismo, se ha evidenciado que la exposición excesiva a la radiación de luz azul puede inducir lesiones en el fondo del ojo, manifestándose en forma de miodesopsias, y que el uso de dispositivos digitales podría acelerar la degeneración vítrea [14]. De manera similar, en estudios experimentales con ratas albinas expuestas a distintos niveles de luminancia LED, incluyendo el componente azul, se demostró que la fracción azul del LED blanco puede provocar toxicidad retiniana tanto en condiciones ambientales domésticas como en escenarios de exposición extrema [15].

Los estudios que se han realizado sobre la luz azul artificial aún siguen en curso de investigación, sin embargo, cabe resaltar que se ha demostrado una incidencia en el desencadenamiento de procesos metabólicos que, de igual manera, puede provocar una degradación a largo plazo de la integridad celular y favorecer la muerte celular prematura; las señales de daño observadas en el sistema ocular presentan peligros de diferente magnitud [8]. En resumen, se puede encontrar varias investigaciones realizadas sobre la luz azul artificial, desde sus beneficios hasta sus consecuencias negativas sobre diferentes sistemas del cuerpo humano. Especialmente el sistema ocular, donde este se ve expuesto a distintas cantidades y espectros de luz, natural o artificial, a lo largo de la vida de una persona, resultando en problemas oculares a largo plazo [9].

Conviene subrayar que, si bien no es una causa principal, el uso prolongado de dispositivos digitales puede acelerar el padecer de miopía o astigmatismo. Sin embargo, cabe destacar que el uso de los métodos preventivos contra la luz azul sí generan cierto tipo de protección contra los rayos que penetran la retina, los más conocidos con los lentes antirreflejo, los filtros de luz azul, el modo oscuro de las pantallas y tomar descansos de 20 minutos fuera de las pantallas después de cierto tiempo. A pesar de la existencia de métodos preventivos, muchas personas no los utilizan adecuadamente, lo que agrava los efectos adversos de la luz azul.

Por ello, este proyecto busca no solo generar conciencia sobre el uso adecuado de los dispositivos electrónicos para la salud del usuario, sino también cuantificar el impacto que tiene la luz azul sobre la retina; midiendo distintas intensidades en varios ambientes y diseñar un dispositivo que sea capaz de medir esta longitud de onda en el espectro visible mediante el uso de un sensor de color TCS34725. Este dispositivo será implementado en lentes comunes (sin ningún tipo de filtro o lente modificado), con el objetivo de tomar mediciones en tiempo real de la luz azul emitida por la computadora o celular; y luego, mediante un microcontrolador, se transformarán las muestras tomadas a datos biométricos de la retina y el procesamiento de dichas señales. Tomando principalmente como sujetos de estudio a la población de jóvenes universitarios, quienes utilizan la mayor parte de su tiempo los teléfonos inteligentes y computadoras para llevar a cabo sus labores universitarias.

### 4.1. Objetivo general

Desarrollar un sistema de medición de luz azul para la evaluación continua de la prevalencia y posibles efectos de la luz azul proveniente de diversos dispositivos digitales convencionales.

### 4.2. Objetivos específicos

- Diseñar y calibrar un prototipo capaz de medir la intensidad y prevalencia de luz azul utilizando un sensor de color TCS34725. Implementar el sensor a lentes sin ningún tipo de filtro o graduación para realizar pruebas en tiempo real.
- Medir y caracterizar las intensidades de luz azul que generan diversos dispositivos electrónicos convencionales utilizados durante largos periodos de tiempo, típicamente por estudiantes universitarios.
- Evaluar la eficacia de los lentes antirreflejo o con filtro azul, y el modo nocturno en relación con la protección que brindan ante la luz azul emitida por los dispositivos digitales (computadoras, teléfonos inteligentes y televisores). Implementando este filtro al modelo final, y tomando las mismas mediciones.

El presente trabajo de graduación se enfoca en el desarrollo de un sensor para la medición de luz azul, utilizando un sensor TCS34725 y un microcontrolador ESP32.

El alcance del estudio se limita a la capacitación del sensor para calcular la irradiancia asociada a la longitud de onda correspondiente a la luz azul. Con esta metodología, se buscó determinar el impacto potencial de la luz azul en estudiantes universitarios, realizando pruebas basadas en el uso típico de dispositivos digitales (computadora, teléfono inteligente y televisor), definidos a partir de una encuesta aplicada a dicha población. No se incluye el estudio del impacto biológico real sobre la retina ni la validación clínica, sino una estimación basada en la información experimental obtenida.

En este trabajo no se contempla la implementación clínica ni la validación en pacientes debido a la naturaleza exploratoria del proyecto, las limitaciones de tiempo y recursos, y la ausencia de autorización ética para estudios en humanos.

Finalmente, este estudio permite sentar las bases para futuras investigaciones orientadas a la evaluación fisiológica de los efectos de la luz azul, así como el desarrollo de dispositivos de medición más precisos y aplicables en contextos médicos o de salud preventiva.

## 6.1. El espectro electromagnético

La luz no está formada solo por los colores que vemos, como el rojo, el azul o el verde. En realidad, hay otros colores que nuestros ojos no pueden ver, pero que pueden detectarse con instrumentos especiales. Por ejemplo, más allá del violeta están los rayos ultravioletas, los rayos X y los rayos gamma. En el otro extremo, después del rojo, encontramos el infrarrojo y las ondas de radio [16].

Los científicos llaman a todo esto radiación electromagnética. El término “radiación” implica que la energía se propaga de un lugar a otro sin necesidad de que las cosas estén en contacto. Cada tipo de luz tiene una cantidad de energía distinta, medida en longitudes de onda lambda ( $\lambda$ ), los rayos gamma son los que tienen más energía y las ondas de radio, la menor. Esta energía se propaga en forma de onda, y cada onda tiene un tamaño diferente. Cuanta más energía tiene la luz, más pequeña es su longitud de onda. Por ello, los rayos X tienen ondas mucho más pequeñas que la luz visible, y las ondas de radio son mucho más grandes [16].

Esta energía en forma de luz forma parte de un rango denominado espectro electromagnético, este rango utiliza dos parámetros comunes: frecuencia y longitud de onda ( $\lambda$ ), donde cada región del espectro visible e invisible se divide según su energía (Cuadro 1) [17].

La luz visible es una porción muy pequeña del espectro electromagnético que los ojos humanos pueden percibir, con longitudes de onda que oscilan entre aproximadamente 400 y 700 nm, abarcando los colores que van desde el violeta hasta el rojo. Cada color corresponde a una longitud de onda específica (Cuadro 2). Esta luz viaja como una onda electromagnética que contiene energía; las longitudes de onda más cortas tienen más energía (violeta) y las más largas, menos (rojo).

**Cuadro 1.** Espectro electromagnético con frecuencia, longitud de onda y energía promedio del fotón [17]

Región	Frecuencia (Hz o ciclos/s)	Longitud de onda (m)	Energía del fotón (eV, promedio)
Rayos gamma	$10^{22} - 10^{19}$	$10^{-11} - 10^{-14}$	$10^5$
Rayos-X	$10^{17} - 10^{20}$	$10^{-8} - 10^{-11}$	$10^3$
Ultravioleta	$10^{15} - 10^{17}$	$10^{-6} - 10^{-8}$	$10^3$
Visible	$10^{14} - 10^{15}$	$4 \times 10^{-6} - 7 \times 10^{-6}$	1
Infrarrojo	$10^{11} - 10^{14}$	$10^{-3} - 10^{-5}$	$10^{-3}$
Microondas	$10^9 - 10^{11}$	$10^{-1} - 10^{-3}$	$10^{-5}$
Ondas de radio	$10^3 - 10^9$	$10^3 - 10^{-1}$	$10^{-9}$
Corriente alterna	$10^2 - 10^3$	$10^7 - 10^5$	$10^{-15}$

**Cuadro 2.** Rangos de longitud de onda para diferentes colores dentro del espectro visible

<b>Rojo</b>	630 – 760 nm	<b>Azul</b>	440 – 490
<b>Naranja</b>	590 – 630	<b>Índigo</b>	420 – 440
<b>Amarillo</b>	560 – 590	<b>Violeta</b>	380 – 420
<b>Verde</b>	490 – 560	<b>Púrpura</b>	No un color espectral puro

### 6.1.1. Ley del cuadrado inverso

La intensidad de luz azul disminuye cuando aumenta la distancia entre la fuente y la superficie que la recibe. A esta relación se le llama *ley del cuadrado inverso*. Para la radiación electromagnética, esta ley establece que la intensidad medida es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia  $d^2$  a la fuente [18]. Es decir, cuanto más lejos está el receptor, habrá una menor intensidad de luz. Esta relación está dada por la ecuación:

$$I(\alpha) \frac{1}{d^2} \quad (1)$$

**Donde:**

$I(\alpha)$  = intensidad/valor de la fuente de energía

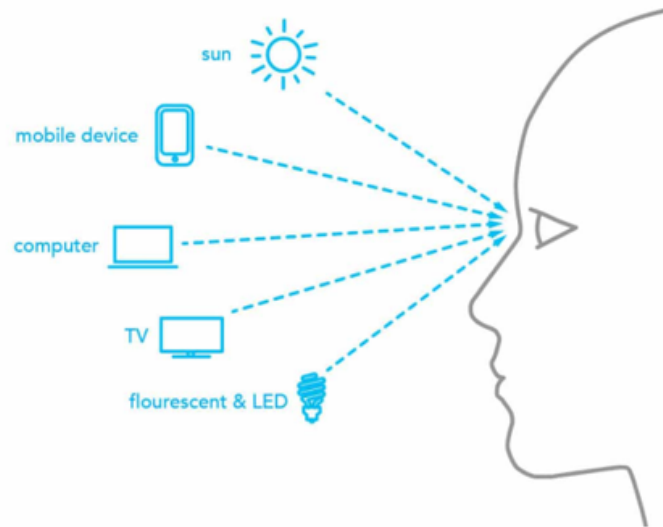
1 = es una constante

$d^2$  = la distancia entre el emisor y el recetor

## 6.2. Luz azul

La luz azul, también llamada luz visible de alta energía (HEV), forma parte del espectro visible y se sitúa aproximadamente entre 400 y 500 nm. Debido a su longitud de onda corta, transporta más energía que los demás colores visibles. Esta luz atraviesa el ojo con poca filtración natural, llegando hasta la retina, lo que puede generar tanto efectos positivos como riesgos potenciales para la salud ocular [19].

La principal fuente de luz azul es el sol, pero también la emiten dispositivos electrónicos como computadoras, teléfonos inteligentes, tabletas, televisores y bombillas LED o fluorescentes [19] (Figura 1).



**Figura 1.** Luz azul emitida por dispositivos y por el sol, percibida por los ojos humanos [19]

### 6.3. Luz azul en dispositivos digitales

Los dispositivos digitales emiten luz con una distribución espectral distinta de la luz natural, la cual varía a lo largo del día y a la que nuestros ojos están adaptados. Las pantallas generan luz azul visible de alta energía (HEV), un tipo de luz con energía similar a la de la radiación ultravioleta. Debido a su alta energía, la luz azul tiene un mayor potencial que otras longitudes de onda visibles para causar daño en los tejidos oculares [20].

### 6.4. Anatomía y funcionamiento del ojo humano, interacción con la luz

El ojo humano está compuesto por distintas partes (Figura 2) que nos ayudan diariamente con la interpretación de la luz para formar una imagen detallada de nuestro entorno, enviando señales eléctricas a nuestro cerebro. Sin embargo, en esta sección se resaltan las partes más importantes para esta interpretación.

#### **6.4.1. Córnea**

La córnea es la lente más potente gracias a su forma y curva, y a su alto índice de refracción. Está formada por tres capas: la más externa es el epitelio corneal cuya función es proteger el estroma y regular el paso de lágrimas, seguida del estroma corneal compuesto por fibras de colágeno organizadas de manera uniforme, lo que le da transparencia [21].

El limbo esclero-corneal es donde la córnea se une a la esclera y las fibras dejan de estar ordenadas. Más allá, el colágeno se vuelve irregular y refleja la luz, lo que da lugar al color blanco característico de la esclera. Gracias a la transparencia de la córnea, la luz entra al ojo, pasa por la pupila y permite una visión clara [21].

#### **6.4.2. Retina**

La retina, también llamada túnica interna, recubre toda la parte interna del ojo. Se extiende sobre el cuerpo ciliar formando un epitelio no pigmentado. Su función principal es captar la luz, procesar la información y transmitir las señales visuales al cerebro. Por fuera está en contacto con la coroides, y por dentro con el humor vítreo, lo que permite cumplir su papel en la visión [21].

#### **6.4.3. Mácula**

En la parte posterior de la retina se encuentra la mácula, que se distingue por un tono ligeramente amarillento y por vasos sanguíneos más delgados. En su centro está la fovea, donde solo hay conos, responsables de la visión detallada y del color, que necesitan más luz (energía) para funcionar. Fuera de la mácula hay conos y bastones, aunque predominan los bastones, que permiten la visión periférica y en condiciones de poca luz, ya que se activan con estímulos más débiles [21].

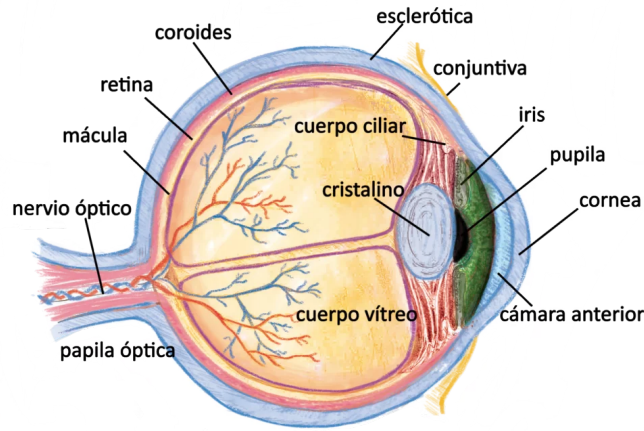
#### **6.4.4. Cristalino**

Detrás del iris se encuentra el cristalino, que, al estar en contacto con su superficie posterior, le da firmeza al iris. La ausencia del cristalino provoca un temblor en el iris, conocido como iridodonesis, el cual se puede observar en pacientes cuyo cristalino ha sido luxado [21].

#### **6.4.5. Coroides**

La coroides es una capa pigmentada rica en vasos sanguíneos que comienzan en la parte posterior del ojo, donde es más gruesa, y se extiende hasta el cuerpo ciliar. Por

fuera se une a una esclera mediante láminas de colágeno poco compactas, formando un espacio llamado supracoroides, que contiene fibroblastos y melanocitos. Este espacio sirve como punto de anclaje para la esclera y actúa como barrera térmica frente a la luz, protegiendo las estructuras internas del ojo [21].



**Figura 2.** Anatomía y partes del ojo humano en corte longitudinal

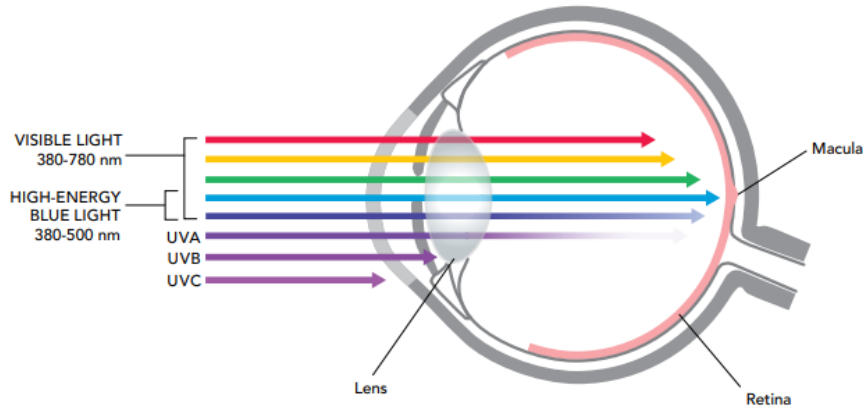
#### 6.4.6. Epitelio pigmentario

El epitelio pigmentario es la capa más profunda de la retina y está relacionado con los conos y los bastones. Está formado por células hexagonales con gránulos de pigmento, cuya función es absorber la luz, mantener el equilibrio del medio extracelular y contribuir a la regeneración del pigmento visual. Los fotorreceptores (conos y bastones) son células nerviosas que captan la luz y la transforman en señales eléctricas para que el cerebro pueda interpretar la imagen percibida [21].

### 6.5. Procesamiento de la luz en la retina

La retina capta la luz visible y forma parte del sistema nervioso central. Sus células fotorreceptoras convierten la luz en señales eléctricas mediante un proceso llamado fototransducción. Luego, otras células de la retina transmiten esta información al cerebro, donde se interpreta para funciones tanto visuales como no visuales. Sin embargo, una exposición excesiva a la luz puede dañar la retina, causando muerte celular, degeneración retinal y estrés oxidativo [22].

La luz visible, procedente de fuentes naturales y artificiales, se transmite a la retina en el rango de 380 a 780 nm. La córnea y el cristalino del ojo humano adulto son eficaces para impedir que los rayos ultravioletas lleguen a la retina, que es sensible a la luz. Sin embargo, la luz azul de alta energía (HEV) es diferente, ya que atraviesa la córnea y el cristalino (Figura 3), alcanzando la retina y la mácula [20].



**Figura 3.** Captura de la luz por la retina, diferentes longitudes de onda [20]

### 6.5.1. Efectos de la luz azul sobre la salud ocular

Las investigaciones sobre el efecto de la luz azul en el ojo identifican dos tipos principales de daño retiniano: fototérmico y fotoquímico. El daño asociado a la luz azul es fotoquímico y ocurre en el rango de 380 a 550 nm, especialmente por exposición a fuentes artificiales muy brillantes y con alto contenido de luz azul, como lámparas LED (light emitting diode) [20]. Este daño se considera irreversible y se acumula con el tiempo según la intensidad y duración de la exposición. Puede producirse tanto por alta intensidad en periodos cortos como por baja intensidad durante años.

Estudios epidemiológicos sugieren que la degeneración macular asociada a la edad (DMAE), causa principal de ceguera, podría estar relacionada con el daño fotooxidativo acumulado por la luz azul solar. Con el aumento de pantallas LCD y OLED, investigaciones recientes evalúan el impacto a largo plazo de su emisión de luz azul, incluso proponiendo revisar los límites de exposición actuales [20] [11].

Cuando la luz llega a la retina, no solo es absorbida por los conos y bastones, sino también por las células ganglionares retinianas intrínsecamente fotosensibles (ipRGC), que contienen el fotopigmento melanopsina. Este pigmento es especialmente sensible a longitudes de onda cortas, entre 446 y 480 nm, es decir, a la luz emitida por pantallas LED, como las de los teléfonos inteligentes. La información luminosa se transmite por el tracto retino-hipotalámico hasta el núcleo supraquiasmático (NSQ) en el hipotálamo, nuestro “reloj interno”, que luego envía señales a la glándula pineal y la pituitaria, regulando funciones circadianas [23].

### Fatiga o síndrome visual informático

El síndrome visual informático (SVI) es el conjunto de molestias oculares asociadas al uso prolongado de pantallas y constituye un motivo de consulta cada vez más frecuente. Se define como “el conjunto de problemas oculares y visuales relacionados con el trabajo cercano al computador” e incluye síntomas como ojo rojo, ardor, pica-

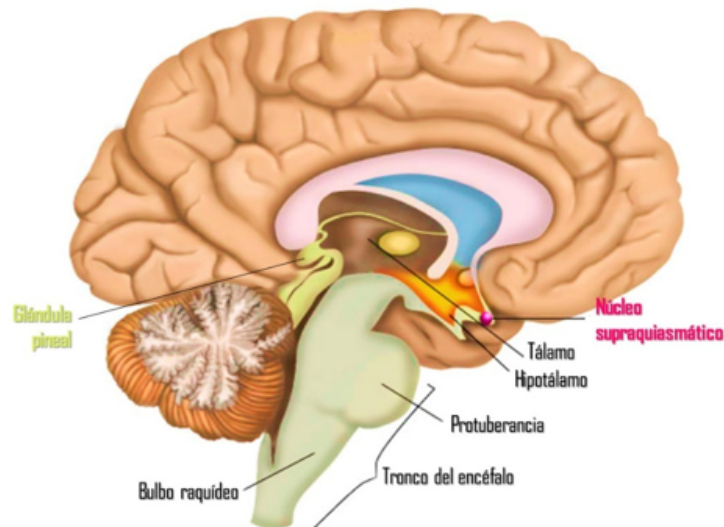
zón, visión borrosa, cefalea y sensación de pesadez en los párpados. El uso continuo de pantallas también altera la superficie ocular, aumentando el riesgo de ojo seco [12].

## 6.6. El ritmo circadiano

El ritmo circadiano regula nuestro ciclo de sueño y vigilia, sincronizándolo con el ciclo natural de luz y oscuridad que produce la rotación de la Tierra. Esto asegura que estemos despiertos durante el día y que durmamos por la noche. Cuando este ritmo se desajusta, ya sea por factores internos o externos, pueden surgir problemas como insomnio, fatiga y bajo rendimiento [24].

Los trastornos del sueño se clasifican en varias categorías y los relacionados con el ritmo circadiano se consideran aparte porque suelen deberse a una combinación de causas internas y ambientales. Sus síntomas más comunes son el insomnio o la somnolencia excesiva. Para diagnosticar estos trastornos, se recomienda llevar un registro diario de actividades, comidas, ejercicio, siestas y horarios de sueño durante al menos dos semanas [24].

Fisiológicamente hablando, el ritmo circadiano es controlado por nuestro reloj biológico interno, al cual se le conoce como núcleo supraquiasmático (NSQ), una pequeña estructura ubicada en el hipotálamo. Este núcleo (Figura 4) es esencial para que el cuerpo se adapte a los cambios de luz y oscuridad durante el día, asegurando que nuestras funciones internas estén sincronizadas con el entorno [25]. Sus principales funciones son: la regulación del ciclo sueño-vigilia, la sincronización de los ritmos hormonales, el control de la temperatura corporal y el control del apetito.



**Figura 4.** El núcleo supraquiasmático, resaltado en rosado, se encuentra ubicado en el hipotálamo del cerebro humano.

## **6.7. Trastornos del sueño asociados al ritmo circadiano**

### **6.7.1. Insomnio**

El insomnio es un trastorno del sueño caracterizado por la dificultad para iniciar o mantener el sueño, o por no lograr una calidad y una duración adecuadas para recuperar energía y mantener un estado de alerta normal. Suele acompañarse de fatiga diurna, malestar y deterioro en la vida social y laboral. Estudios han demostrado que la exposición a la luz azul (460 nm) antes de dormir reduce significativamente la producción de melatonina, aumenta la temperatura corporal y altera los patrones de sueño [26].

Los trastornos del sueño son un motivo de consulta frecuente, y la mayoría de los pacientes se quejan de insomnio si se les pregunta sobre el sueño. El resultado de numerosos pacientes ha permitido concluir que es un trastorno subyacente más que una enfermedad como tal. La exposición a la luz de corta longitud de onda antes de dormir puede interrumpir patrones de sueño [27].

### **6.7.2. Hipersomnia**

La hipersomnia es una queja frecuente en la práctica neurológica y se refiere a una somnolencia excesiva durante el día. La somnolencia es un estado fisiológico que favorece el inicio del sueño, pero cuando se presenta de forma inapropiada y diaria durante al menos tres meses, se considera excesiva somnolencia diurna (ESD). Los pacientes suelen describirla como cansancio o fatiga, aunque el síntoma principal es la sensación persistente de sueño en momentos inadecuados [28].

## **6.8. Influencia de la luz Azul en el sueño**

La longitud de onda de la luz azul puede afectar el ritmo circadiano y provocar trastornos del sueño. Diversos estudios han analizado cómo la exposición a la luz azul influye en el descanso, comparándola con otras luces como blanca, roja o naranja. También se han evaluado dispositivos electrónicos (teléfonos, tabletas, computadoras) frente a condiciones de control que incluyen filtros de luz azul, como gafas o pantallas que bloquean dicha radiación. Los resultados sugieren que la luz azul, especialmente antes de dormir, puede alterar la producción de melatonina y afectar la calidad del sueño [29].

Los métodos más utilizados para evaluar la influencia de la luz azul en el sueño incluyen la escala de somnolencia de karolinska, la polisomnografía y el índice de calidad del sueño de Pittsburgh. Los resultados son contradictorios: algunos estudios reportaron una menor somnolencia subjetiva tras la exposición a la luz azul, mientras que otros encontraron una mayor somnolencia al usar gafas que bloquean dicha luz.

Además, se ha observado que la exposición a la luz azul puede retrasar el estado de alerta matutino, lo que refuerza la evidencia de que la luz puede aumentar el cansancio [29].

Diversos estudios han demostrado que la exposición prolongada a la luz azul puede reducir la calidad del sueño y aumentar la latencia, es decir, el tiempo que tardamos en quedarnos dormidos [29]. En promedio, una persona debería conciliar el sueño de 20 a 30 minutos, pero una baja latencia no siempre indica una buena eficiencia del sueño. Además de generar fatiga visual y cansancio, la luz azul afecta negativamente el ritmo circadiano y disminuye la calidad del sueño.

## 6.9. Lentes con filtro azul y antirreflejo

### 6.9.1. Principios ópticos de lentes que bloquean la luz azul

1. **Principio de reflexión:** cuando la luz visible u otra radiación electromagnética incide sobre una superficie metálica pulida.
2. **Principio de refracción:** dependiendo del ángulo de incidencia, cuando la luz visible incide sobre la superficie de un material transparente como el agua o el vidrio, ocurre una refracción en dicho material.
3. **Principio de dispersión:** cuando la luz choca con partículas muy pequeñas como la niebla o el polvo fino, ocurre un fenómeno de dispersión, cuyo grado depende de la frecuencia de la luz.

### 6.9.2. Lentes antirreflejo

Es un tipo de tratamiento que se le coloca a los lentes oftalmológicos, su función es la de permitir el paso del 99.55 % de la luz, eliminando el resplandor producido por toda la luz reflejada y mejorando la transparencia del lente y calidad de visión [30].

### 6.9.3. Lentes con filtro de luz azul

Aunque no se ha demostrado su efectividad, los LIO (lentes intraoculares) con filtro azul implementado tienen el objetivo de proteger la retina a la exposición de luz azul artificial [3]. Estudios realizados demuestran que la efectividad de estos lentes disminuye parcialmente los efectos de la luz azul [27], reduciendo la fototoxicidad en un 10.6 %-23.6 %.

## 6.10. Indicadores de riesgo por luz azul

En este estudio, los indicadores de riesgo por luz azul se derivan a partir de la irradiancia estimada para cada canal del sensor TSC3472. La luz azul, en particular, es un componente de alta energía de la luz visible que puede tener efectos perjudiciales sobre los ojos humanos, especialmente cuando se expone a ella durante largos períodos de tiempo. Para evaluar este riesgo, se pueden emplear las siguientes métricas y fórmulas descritas en estudios previos sobre la toxicidad de la luz azul.

### 6.10.1. *Blue Light Hazard Function* $B(\lambda)$

*Blue light hazard function*  $B(\lambda)$ , es una función de riesgo por luz azul, curva espectral que describe el daño potencial a la retina debido a la luz azul, específicamente en longitudes de onda cercanas a los 450 nm [20]. Esta función es utilizada para ponderar la luz medida en los diferentes canales del sensor, especialmente en el canal azul (B).

**Función general:**

$$B(\lambda) = \int I(\lambda) \cdot B(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

**Donde:**

$I(\lambda)$  = irradiancia espectral de la luz en función de onda ( $\mu W/cm^2$ )

$B(\lambda)$  = función de riesgo por luz azul, la cual pondera la respuesta biológica de la luz azul en la retina humana.

Sin embargo, según la norma de pruebas de bioseguridad óptica IEC 62471 [31], esta fórmula solo se establece para lámparas y LEDS, para dispositivos electrónicos, se debe tomar en cuenta la distancia y el tiempo de exposición. Al igual que otros factores, como *blue light toxicity factor* (BLTF) y *radiance protection factor* (RPF).

### 6.10.2. Factores derivados (BLTF, RPF)

*Blue light toxicity factor* (BLTF) es un indicador que calcula el riesgo relativo del daño retinal al comparar la luz emitida por una fuente (en este caso, una pantalla digital) con una fuerte referencia estándar [20].

**Fórmula general:**

$$BLTF = \frac{\int I(\lambda) \cdot B(\lambda) d\lambda}{\int I(\lambda) \cdot Y(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

Donde:

$I(\lambda)$  = irradiancia espectral medida ( $\mu W/cm^2$ ).

$B(\lambda)$  = función de riesgo por luz azul.

$Y(\lambda)$  = función fotópica que describe la sensibilidad del ojo humano a la luz a través del espectro visible.

La función BLTF no toma únicamente en cuenta la porción más dañina de la luz azul, sino que se extiende considerando toda la porción de la luz visible que abarca la luz azul (415 nm - 500 nm) y sus potenciales efectos en la salud [20]. BLTF corresponde al rango de radiancia efectiva de la luz azul en pantallas encima de la luminancia calculada, que debería ser menor a 0.085. Es decir, las pantallas digitales no pueden sobrepasar ese valor (Figura 5).

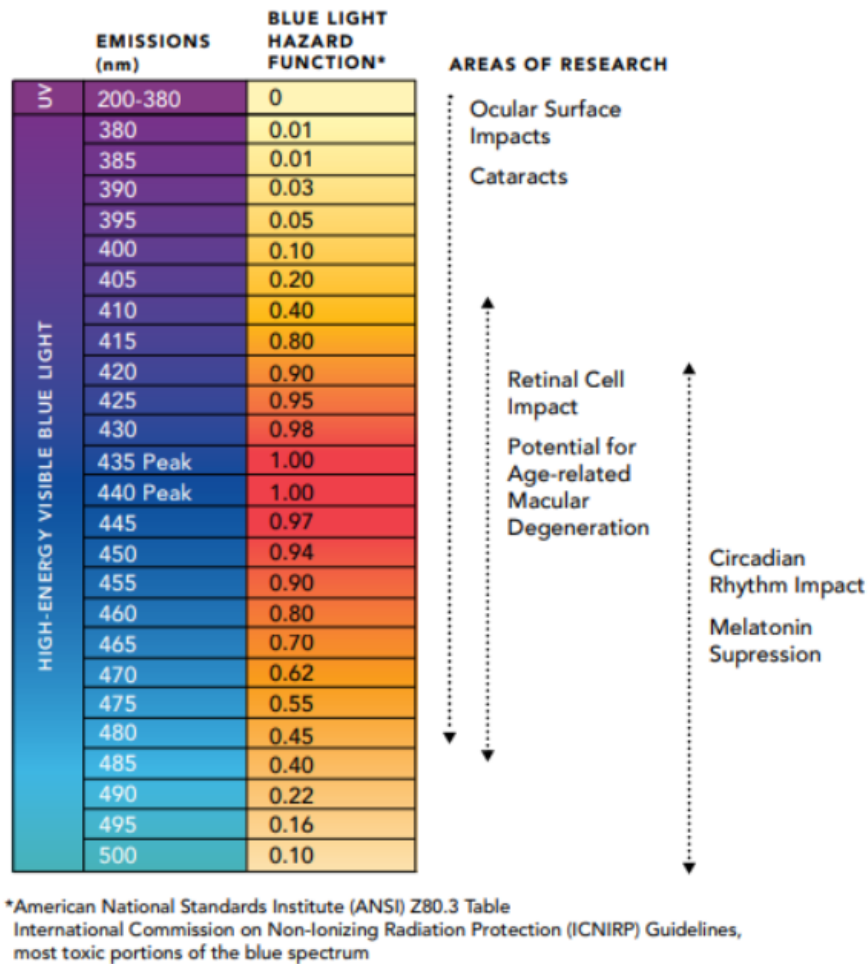


Figura 5. Toxicidad de la luz azul y su impacto potencial en la salud ocular y humana [20]

*Radiance protection factor* (RPF) es un índice que cuantifica cuánta protección se tiene contra la luz azul. Un RPF más alto significa un menor riesgo de exposición. Además, las pantallas digitales deben cumplir con un RPF mayor o igual a 35, que

es igual a un valor de BLTF de 0.085 (Figura 6) [20].

**Fórmula general:**

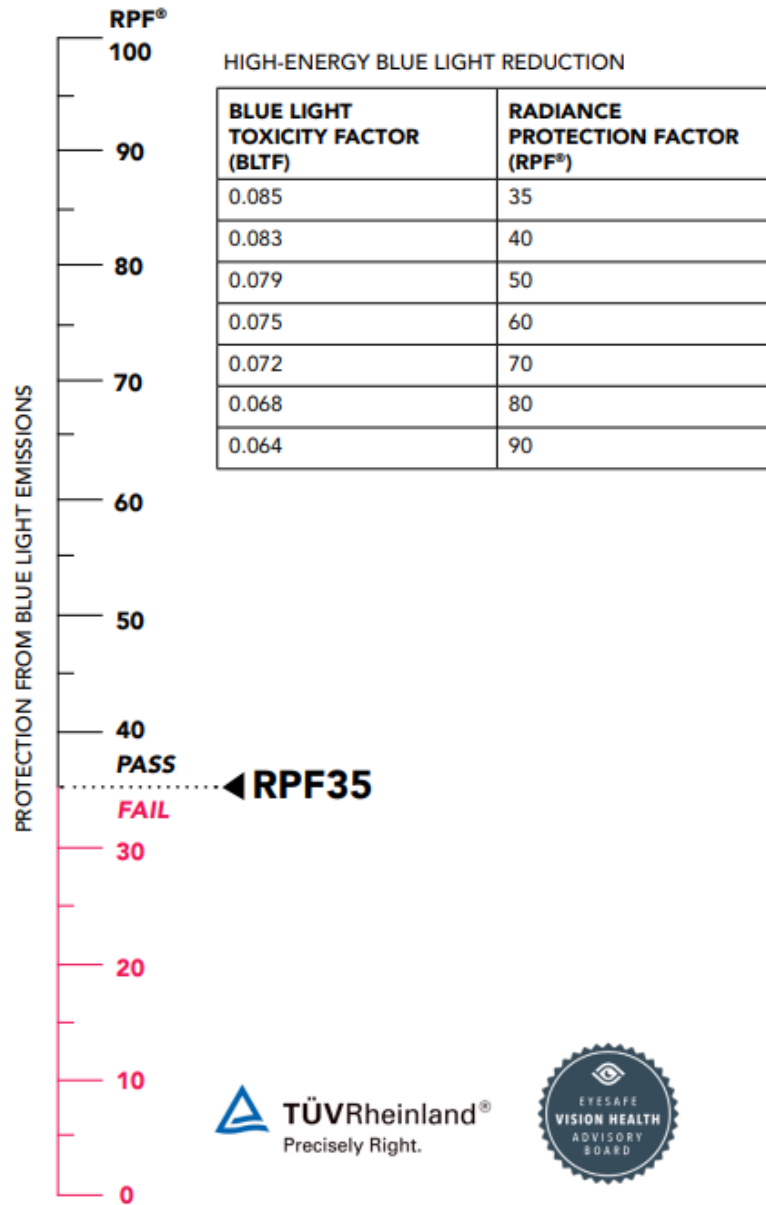
$$RPF = \frac{260 \cdot (BLTF_{D65} - BLTF_{test})}{BLTF_{D65}} \quad (3)$$

**Donde:**

$BLTF_{D65}$  = valor de referencia para una fuente de luz D65, que es la luz blanca estándar utilizada en la industria.

$BLTF_{test}$  = valor calculado para la pantalla medida.

El RPF proporciona una forma de comparar el riesgo relativo entre diferentes dispositivos, ayudando a comprender cómo los niveles de irradiancia de la luz azul contribuyen al riesgo visual por exposición [20].



**Figura 6.** El RPF que designa el nivel de reducción de luz azul de alta energía en las pantallas digitales, métrica basada en investigaciones, verificada por terceros y respaldada por líderes en la comunidad del cuidado ocular [20]

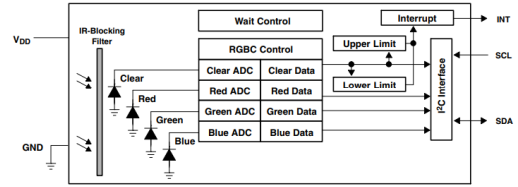
## 7.1. Instrumentación y materiales

### 7.1.1. Sensor de color TCS34725

Se utilizó el sensor RGB TCS3472 con filtro IR (TAOS135, Texas, USA) (Figura 7) para realizar las mediciones de irradiancia, intensidad de luz, en pantallas digitales y poder ejecutar una evaluación aproximada del impacto retinal. El TCS3472 es un fotodetector digital capaz de medir la intensidad de luz incidente en cuatro canales independientes: rojo, verde, azul y luz clara.

La luz entra en el sensor a través de un filtro infrarrojo (IR). Cada canal cuenta con un fotodiodo específico cubierto por un filtro óptico que permite captar únicamente la porción correspondiente del espectro electromagnético. Dependiendo del color detectado, los canales proporcionan un valor analógico convertido a digital mediante cuatro convertidores analógico-digitales (ADC) internos (Figura 7). Los datos adquiridos pueden ser leídos mediante I2C (comunicación serial) utilizando un microcontrolador.

Se emplearon los valores ADC para la conversión de unidades digitales a unidades físicas, en este estudio se obtuvo la irradiancia ( $\mu W/cm^2$ ), tomando en consideración la ecuación de conversión (4) para cada canal y sus variables: valor ADC, responsividad (específico de cada canal y tomado directamente de la hoja técnica [32]), la ganancia y el tiempo de integración. Esta ecuación permite transformar los valores digitales del ADC a irradiancia por canal  $I_\lambda$ .



**Figura 7.** Sensor de color TCS34725 y diagrama de bloques del funcionamiento [32]

**Fórmula:**

$$I_{\lambda} = \frac{ADC_{output}}{R_{\lambda} \cdot G \cdot T_{int}} \quad (4)$$

**Donde:**

$I_{\lambda}$  = irradiancia calculada por canal en  $\mu W/cm^2$ .

$ADC_{output}$  = valores crudos del sensor que van de 0 a 65535 counts (números enteros de 16 bits)

$R_{\lambda}$  = responsividad, regla de conversión que traduce los números del sensor a valores de energía física de la luz en  $\mu W/cm^2$  (Cuadro 3).

$G$  = ganancia, actúa como amplificador electrónico de la señal antes de la conversión digital. Con un ajuste de 4x se logra aumentar la sensibilidad sin llegar a saturar el rango dinámico del ADC en condiciones normales de brillo de pantalla.

$T_{int}$  = tiempo de integración (ms), corresponde al periodo durante el cual los fotodiodos acumulan carga antes de ser digitalizada por el ADC. En este trabajo se utilizó un tiempo de integración de 154 ms. Se tomaron los valores digitales del ADC del canal azul, y fueron convertidos a  $I_b$  (irradiancia azul) con los siguientes valores (Cuadro 3):

**Cuadro 3.** Parámetros configurados por canal y sus características [32]

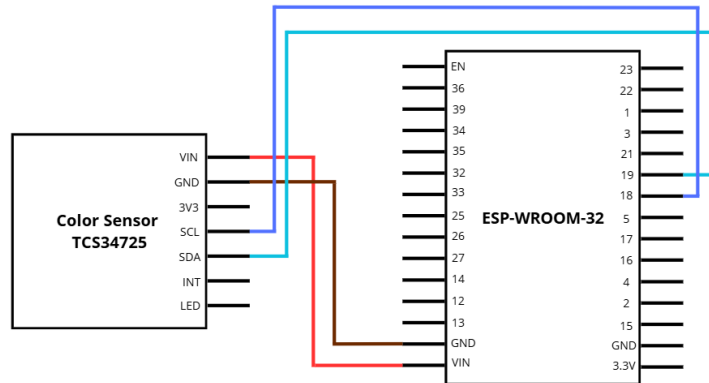
Canal	Responsividad $R_\lambda$	Ganancia (G)	Tiempo de Integración $T_{int}$
Azul	$19.5 \mu W/cm^2$	4x	154 ms
Rojo	$16.6 \mu W/cm^2$	4x	154 ms
Verde	$13.8 \mu W/cm^2$	4x	154 ms
Clear	$45.0 \mu W/cm^2$	4x	154 ms

La radiación incidente es convertida en corriente eléctrica proporcional a la intensidad luminosa, la cual se transforma en un valor digital mediante ADC de 16 bits, integrado en el dispositivo. El canal clear proporciona una medida de la irradiancia total, ya que carece de filtros de color y capta un rango más amplio de luz. Sin embargo, en este estudio únicamente se tomaron en cuenta los valores correspondientes al canal azul, siendo estos los resultados de interés. Esta información permitió estimar tanto la composición cromática de la fuente de luz como su intensidad relativa.

Posterior a realizar los ajustes necesarios, se realizó la comunicación serial con el microcontrolador ESP32 (version 3.0, Espressif Systems, USA), que permitió la lectura periódica de los valores digitales y posterior a su procesamiento para convertirlos en unidades físicas de irradiancia ( $\mu W/cm^2$ ).

### 7.1.2. Microcontrolador ESP32

Para la comunicación I2C con el sensor, se utilizó un microcontrolador ESP32 con entorno de programación C++. Se establecieron los pines 19 como SDA y 18 como SCL, los cuales forman parte de la interfaz de comunicación I2C (Figura 11). Se estableció la comunicación serial con el computador para transferir los datos del sensor bit a bit a través de un solo canal USB. La conexión de pines del ESP32 al sensor TCS34725 se describe a continuación (Figura 8):



**Figura 8.** Esquemático de conexión de pines entre ESP32 y TCS34725

### 7.1.3. Entorno de pruebas

Se evaluó la intensidad de luz emitida por los siguientes dispositivos: Laptop HP Victus 16-d0xxx (HP, USA), Monitor Slim de 24 pulgadas Aiwa AW24FHDM4 full HD (AIWA, Japón), Televisor Samsung modelo PL50B450B1XZP (Samsung, Corea del Sur) version S402 y, finalmente, un iPhone XS 2018 (Apple, USA).

El entorno durante las pruebas se mantuvo dentro de dos condiciones, luces apagadas y luces encendidas. Las luces del dormitorio o lugar de trabajo debían permanecer en cierto estado durante las pruebas, ya que el sensor es también sensible a la luz ambiental y artificial, buscando observar los cambios en el impacto de la luz azul. Las luces del dormitorio son tipo LED 12 W, luz fría. Y las luces de la sala donde se encuentra el televisor son de tipo LED cálido de 16W.

Otro parámetro tomado en cuenta para las mediciones fue la distancia dispositivo-sensor (Cuadro 4), tomando como referencia distancias recomendadas para cada dispositivo [33] [34] [35] y se realizó una estimación de estas distancias para obtener una media y una no recomendada (Cuadro 5). Esto fue considerado debido a al cálculo de la irradiancia y para observar la variabilidad de la misma dependiendo de la distancia, con el fin de determinar si una distancia recomendada disminuye los efectos de la luz azul, y si una no recomendada aumenta el riesgo.

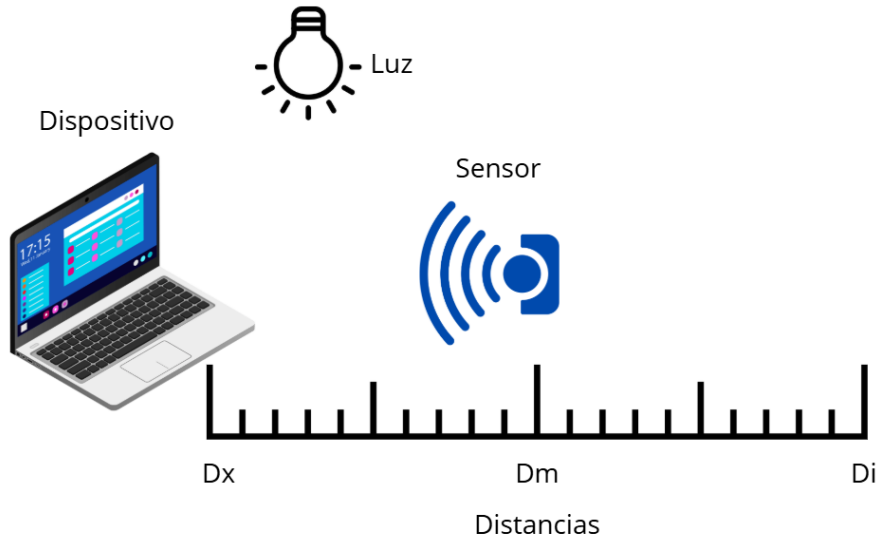
**Cuadro 4.** Distancias recomendadas para dispositivos electrónicos [33] [34] [35]

Dispositivo	Distancia recomendada
Teléfono inteligente	$\approx 30$ cm
Tablet	$\approx 40$ cm
Computadora / Laptop	50 cm a 70 cm
Televisor (Full HD)	$2 \times$ ancho del TV (ej. 55" $\rightarrow$ 2 m)
Televisor (4K)	$\approx$ pulgadas $\times 1.2$ (ej. 55" $\rightarrow$ 1.7 m)

**Cuadro 5.** Distancias utilizadas en la experimentación de cada dispositivo

Dispositivo	Distancia recomendada ( $D_x$ )	Distancia media ( $D_m$ )	Distancia no recomendada ( $D_i$ )
iPhone XS	35 cm	15 cm	5 cm
Computadora/Monitor	50 cm	25 cm	15 cm
TV Samsung	250 cm	125 cm	80 cm

Para una computadora, se recomienda permanecer a una distancia entre 50 a 76 cm, una distancia no recomendada es cualquiera por debajo de esta medida. Para un celular, se recomienda establecer una distancia entre 30 a 40 cm (más o menos el largo de un brazo), y para un televisor se recomienda una distancia entre 170 a 250 cm, dependiendo del tamaño de la pantalla [34]. Un ejemplo de la colocación entre el dispositivo y el sensor se ilustra a continuación (Figura 9). Estas distancias permanecieron constantes a lo largo de toda la fase de calibración y experimental. Estas recomendaciones están respaldadas por estudios ergonómicos que sugieren mantener una distancia mínima de 40 cm para pantallas de computadora, y ajustar la distancia según el tamaño del monitor para evitar fatiga visual y otros efectos negativos [36].



**Figura 9.** Diagrama de ejemplo de colocación de distancias entre el sensor y dispositivo

## 7.2. Procedimiento de medición

### 7.2.1. Calibración

La calibración del sensor se realizó para cada uno de los dispositivos seleccionados, cambiando el entorno a luces apagadas/encendidas y variando distancias. Para cada dispositivo, se colocó el sensor a las distancias descritas en Cuadro 5 para condición de iluminación (luces apagadas y encendidas). Se estableció un fondo blanco en cada dispositivo y se comenzó midiendo con un brillo del 0 %, se tomaron muestras durante 20 segundos y se fue elevando el brillo de los dispositivos en unidades de 10 (10 %, 20 %, 30 %, etc) hasta llegar al 100 %. Este proceso se repitió para cada distancia, con el fin de observar el cambio del brillo vs irradiancia calculada.

El modo night shift o modo nocturno, es una configuración de los dispositivos que aumenta la calidez de las pantallas para reducir la fatiga visual durante la noche. Esta configuración también fue tomada en cuenta para la calibración, repitiendo el mismo proceso descrito en la calibración normal, aunque para el televisor no se adquirieron datos ya que no contaba con esta función. De la misma manera, se calibró una tercera vez el sensor, pero colocando unos lentes con filtro de luz azul frente al mismo y estableciendo los dispositivos en su modo normal (sin modo nocturno). En el caso del iPhone XS, se utilizó la herramienta Siri para controlar el nivel de brillo de manera precisa e inhabilitando la opción "True Tone" que ajusta el brillo según la iluminación. Por configuración, los comandos fueron en inglés ("*Hey Siri, 40 % brightness*").

### 7.2.2. Adquisición de datos

En base a la información obtenida en la encuesta, se realizó el diseño experimental de las actividades diarias que realiza un estudiante universitario; trabajos escritos en Word, investigación, lectura de documentos, videos explicativos y entre otros. Colocando el sensor a las distancias respectivas y variando el tiempo de adquisición durante 10 min, y un tiempo de muestreo de tres segundos. El Cuadro 6 resume el tipo de pruebas realizadas.

**Cuadro 6.** Resumen de pruebas realizadas a los dispositivos con el sensor TCS32745

Dispositivo	Evaluación	Distancia (cm)	Tiempo de Adquisición	Brillo	Entorno	Modo	Lentes
Computadora	Word	25	10 min	40 %	Encendido	Normal	Sí
Monitor	Lectura	50	10 min	50 %	Encendido	Normal	Sí
Televisión	Película	250	10 min	90 %	Apagado	Normal	Sí
iPhone	Redes Sociales	15	10 min	60 %	Encendido	Normal	No
Monitor	YouTube	15	10 min	70 %	Apagado	Night Shift	No

Es importante resaltar que el tipo de pruebas para un día cotidiano depende de la persona que esté siendo evaluada con respecto al uso de dispositivos para estimar el impacto retinal por luz azul. Sin embargo, las pruebas realizadas ofrecen un estándar de uso cotidiano.

## 7.3. Procesamiento de señales

### 7.3.1. Procesamiento en Python para creación de archivos csv.

El preprocesamiento de los datos se llevó a cabo utilizando un script en Python (Guido Van Rossum, Holanda), diseñado para interactuar con el sensor TCS3472 a través del puerto serie. El flujo general del código consistió en la adquisición de datos crudos del sensor y su posterior conversión a unidades de irradiancia ( $\mu W/cm^2$ ).

El script en Python tuvo la tarea principal de leer los datos crudos por el ESP32 en formato csv, que incluyen los valores de las componentes RGBC para cada medición, junto con la irradiancia estimada para cada canal. A continuación, se describen los pasos realizados (Figura 10):

1. **Adquisición:** el ESP32 envía datos continuamente a través de una interfaz serial (UART). El script en Python establece una comunicación con el puerto serial y espera la señal del usuario para iniciar la toma de mediciones, utilizando la tecla SPACE. Una vez que la toma de mediciones comienza, el programa recoge los valores de las componentes R, G, B, y C, así como los valores de irradiancia ( $I_r, I_g, I_b, I_c$ ).
2. **Formato de almacenamiento:** los datos son almacenados en un archivo csv. para permitir su posterior análisis en MATLAB (MathWorks, USA). Cada fila

del archivo cvs. contiene la medición de un instante de tiempo, con las columnas correspondientes a las componentes de color e irradiancias por canal.

3. **Control de intervalo de medición:** el intervalo de tiempo entre cada medición fue ajustado a un segundo para calibración, y tres segundos para experimentación utilizando la función `time.sleep(n)` para controlar el tiempo entre lecturas. Este tiempo de espera fue seleccionado para garantizar que las mediciones no se superpongan y permitir que el sensor estabilice el tiempo de integración.
4. **Preprocesamiento de los datos de irradiancia:** los valores crudos de los canales RGBC fueron convertidos a irradiancia mediante la fórmula de conversión del ADC (4). Los datos contenidos en los archivos csv. fueron exportados a MATLAB, donde se filtraron valores innecesarios para el estudio y tomando en cuenta únicamente Ib, irradiancia en el canal azul.
5. **Análisis en MATLAB:** se utilizó la herramienta MATLAB para el filtrado y obtención de gráficas de interés. El código implementado consistió en la lectura de los archivos cvs. generados en Python, filtrado de los valores RGC (rojo, verde y clear) y obteniendo las mediciones para la irradiancia azul. Los resultados obtenidos se pueden visualizar en la sección de Resultados.

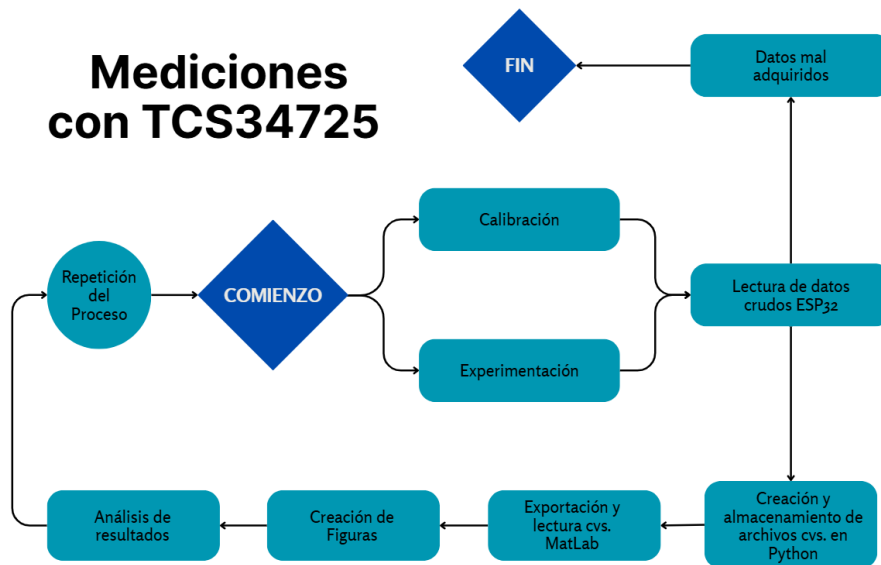
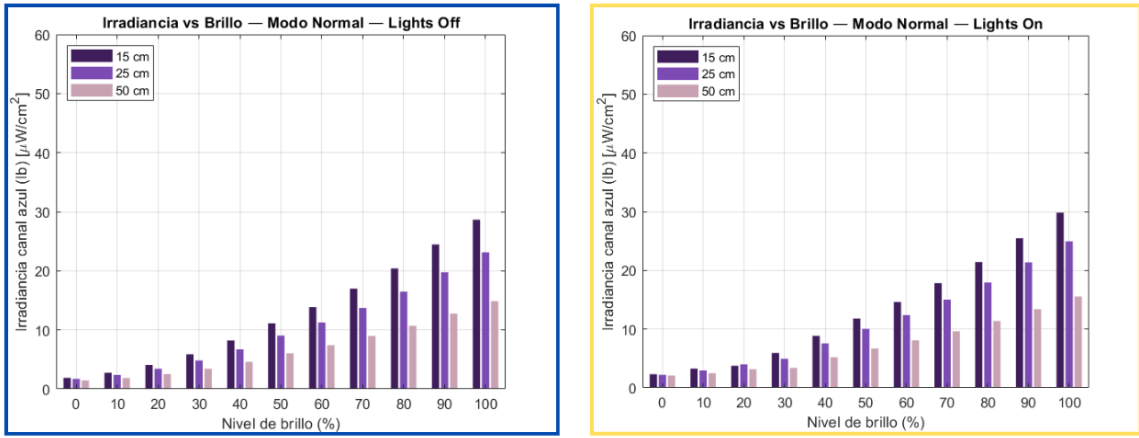


Figura 10. Diagrama de flujo de adquisición de datos y análisis a través de los sistemas utilizados

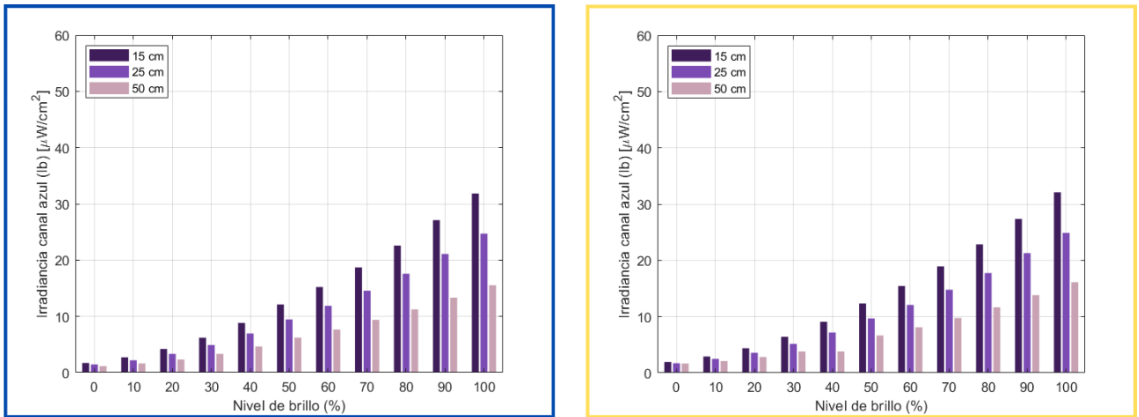
### 8.1. Calibraciones computadora

El valor máximo de irradiancia que puede tomar la computadora a una distancia no recomendada y con luces apagadas es de  $28 \mu W/cm^2$ , mientras que con luces encendidas toma un valor de  $30 \mu W/cm^2$  (Figura 11 (a)). Se observa que para cada caso el crecimiento de irradiancia según el brillo, para todas las distancias, es exponencial. Para el modo nocturno (Figura 11 (b)) se observa un crecimiento de la irradiancia a partir del 40% de brillo a comparación del modo normal, pasando de  $8 \mu W/cm^2$  a  $9 \mu W/cm^2$ , con un brillo del 100%, este valor aumentó de  $29 \mu W/cm^2$  (modo normal) a  $32 \mu W/cm^2$  (modo nocturno), lo cual contradice el objetivo principal de este modo (proteger al usuario de altos niveles de brillo).

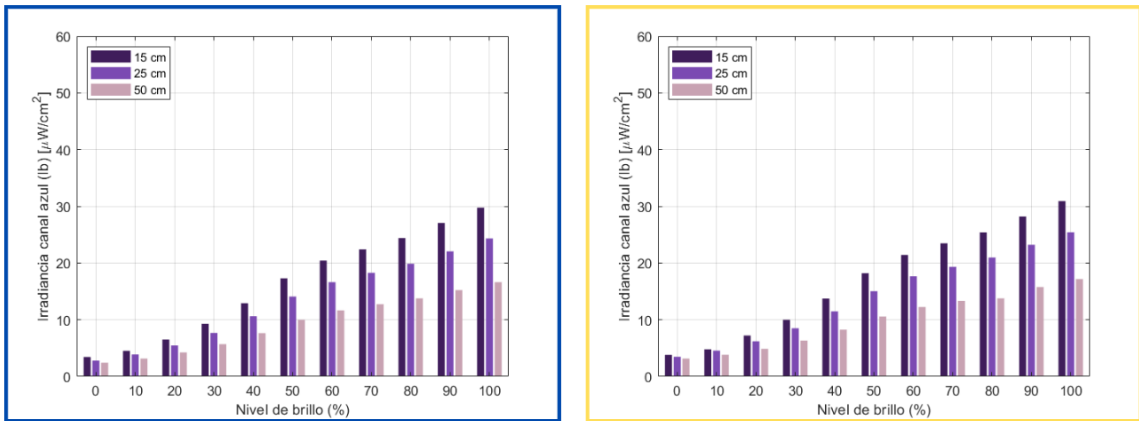
Se obtuvieron los resultados de calibración para el uso de lentes con filtro de luz azul (Figura 11 (c)), estos resultados demuestran un incremento en ambos casos de iluminación y en todos los niveles de brillo, aunque no se observa mayor diferencia entre luces apagadas y encendidas, esto sugiere que la luz de la habitación está siendo mayormente filtrada que la luz de la computadora.



(a) Modo normal



(b) Modo nocturno



■ Luces apagadas

■ Luces encendidas

(c) Filtro azul

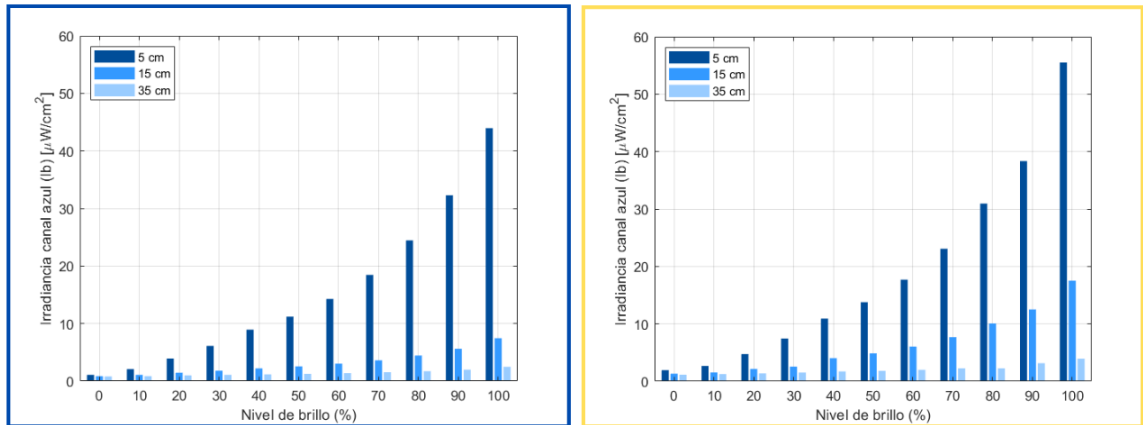
**Figura 11.** Calibración de la computadora/monitor. Las figuras resaltadas en azul representan las mediciones con luces apagadas, y las resaltadas en amarillo representan las mediciones con luces encendidas

### 8.1.1. Calibración iPhone XS

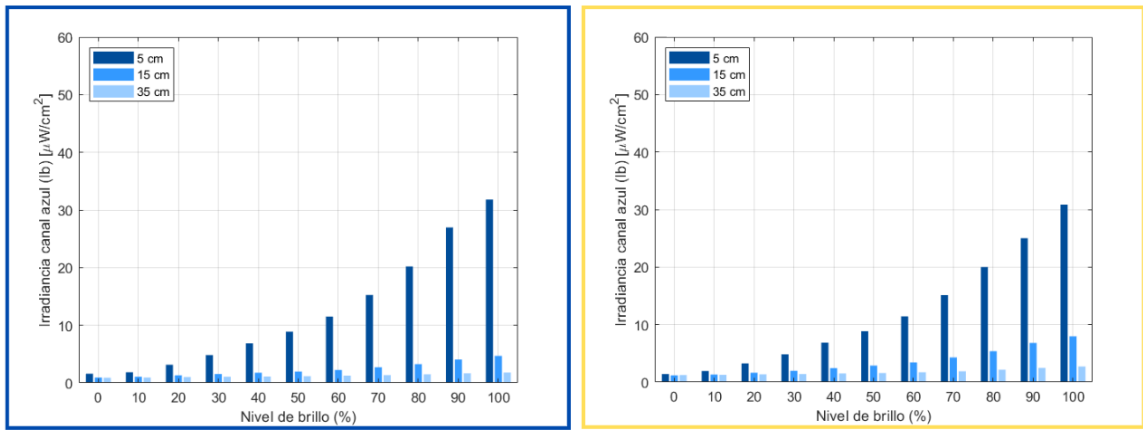
A medida que aumenta el brillo, la irradiancia también aumenta de manera más pronunciada, especialmente a una distancia no recomendada (5 cm) tanto para luces apagadas y luces encendidas. El valor máximo que tomó a un brillo del 100 % fue de  $43 \mu W/cm^2$  (Figura 12 (a)) con luces apagadas y de casi  $60 \mu W/cm^2$  con luces encendidas. La diferencia entre una distancia de 5 cm y 35 cm (recomendada) es aproximadamente del 90 %, ya que el valor máximo que puede tomar el iPhone a 35 cm es menor a  $5 \mu W/cm^2$ . En la distancia media, 15 cm, el incremento es menor aunque no menos significativo.

El modo nocturno, que reduce la emisión de luz en la pantalla cambiando hacia tonos más cálidos (rojos/amarillos), en el caso del iPhone, aunque la irradiancia sigue un patrón similar al modo normal, es más baja en comparación, especialmente a niveles de brillo más altos (Figura 12 (b)). A 5 cm y luces apagadas la irradiancia comienza a aumentar de  $20 \mu W/cm^2$  a partir de un nivel de brillo del 80 %, a las distancias de 15 cm y 35 cm se observa un comportamiento constante en ambos casos. Durante luces encendidas, se observa una disminución leve de la irradiancia en comparación con el caso de las luces apagadas.

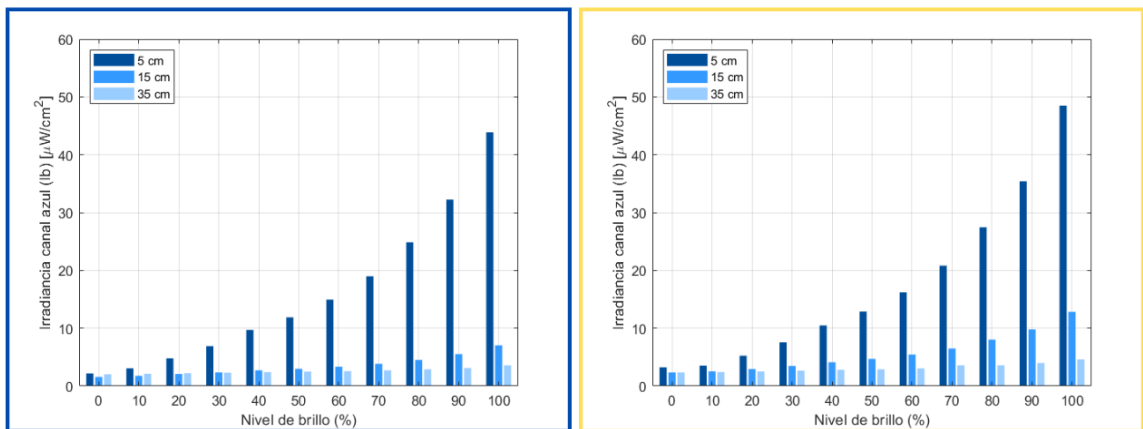
Cuando se aplica el filtro de luz azul (Figura 12 (c)), no se observa mayor cambios entre los niveles de irradiancia a comparación con el modo normal y nocturno, con luces apagadas. Para el caso de las luces encendidas si se obtuvo una irradiancia menor a  $50 \mu W/cm^2$  para el 100 % de brillo, y la irradiancia aumenta de  $20 \mu W/cm^2$  después de superar un 70 % de brillo. Para el caso de luces apagadas, se obtuvieron resultados similares al modo normal, aumentando de  $20 \mu W/cm^2$  a partir de un 80 % de brillo. Al igual que en las distancias medias y recomendadas, los niveles de irradiancia permanecen constantes, aumentando levemente para el mayor nivel de brillo.



(a) Modo normal



(b) Modo nocturno



■ Luces apagadas

■ Luces encendidas

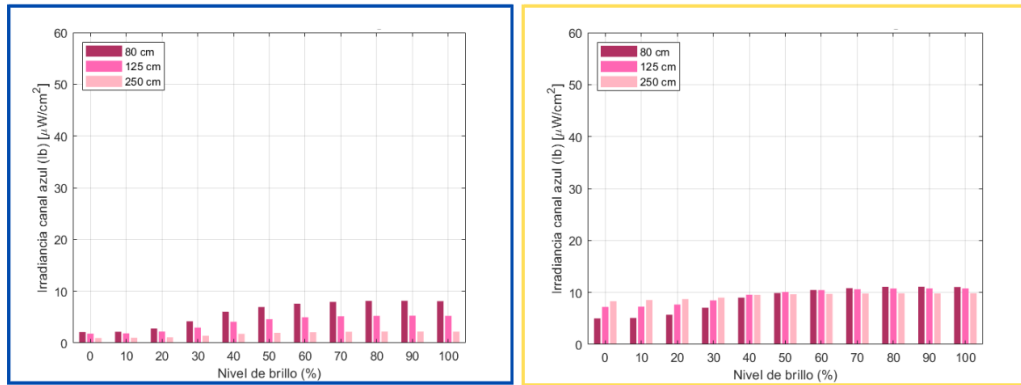
(c) Filtro azul

Figura 12. Calibración del iPhone XS

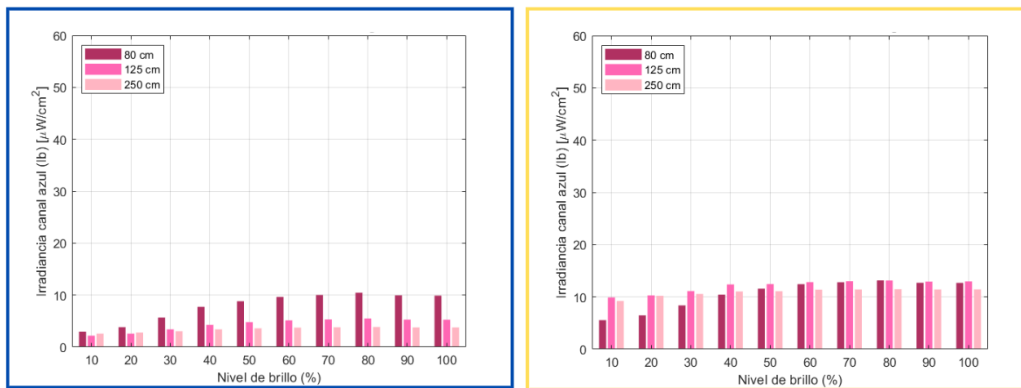
### 8.1.2. Calibración del televisor

En este caso, se omitió la calibración con el modo nocturno, debido a que el modelo del televisor no cuenta con esta función. A pesar de ser una pantalla más grande, los resultados del modo normal muestran una irradiancia por debajo de  $10 \mu W/cm^2$  para todas las distancias y con luces apagadas (Figura 13 (a)). En cuanto a las luces encendidas, de igual manera las mediciones se mantuvieron constantes, superando levemente los  $10 \mu W/cm^2$  a partir de un 40 % de brillo.

Durante el uso de lentes con filtro azul nuevamente se observa un pequeño incremento en los niveles de irradiancia, llegando a  $10 \mu W/cm^2$  luego del 70 % de brillo (Figura 13 (b)) con luces apagadas. Partiendo de un 10 % de brillo, la irradiancia permanece constante para las distancias de 125 cm (media) y 250 cm (recomendada) con luces encendidas y por encima de los  $10 \mu W/cm^2$ . Para los casos de luces apagadas, las distancias más lejanas al televisor muestran valores por debajo de  $5 \mu W/cm^2$ , y con luces encendidas se observa un incremento debido a la influencia de la luz LED, aunque no tan alta como los casos de la computadora y el iphone, puede deberse a su naturaleza de luz cálida y no fría.



(a) Modo normal



(b) Filtro azul

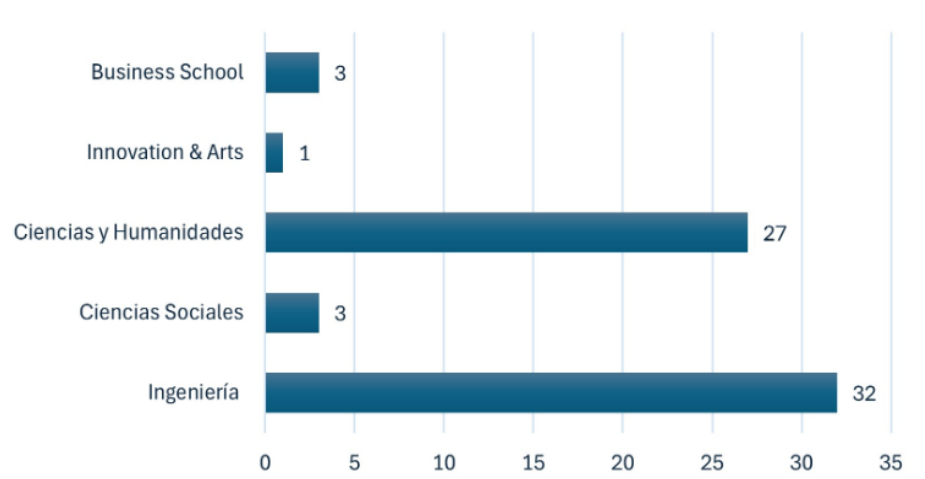
**Figura 13.** Calibración del televisor Samsung

## 8.2. Encuesta a estudiantes UVG

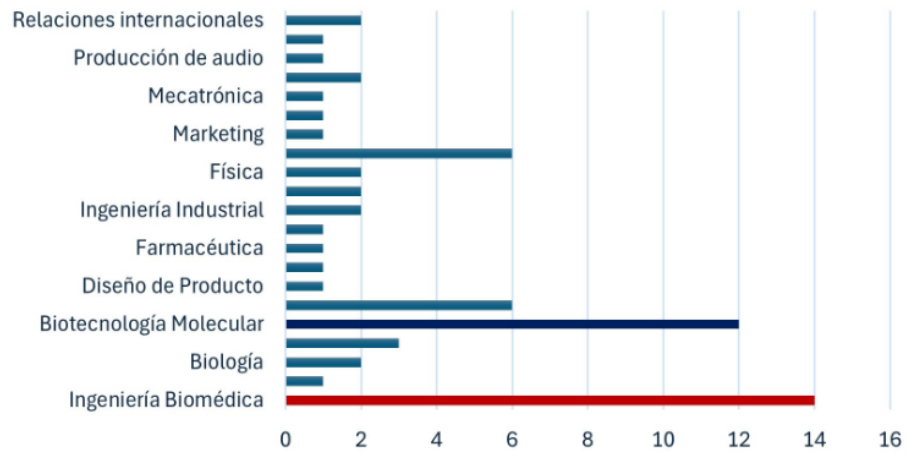
Se realizó una encuesta dirigida a estudiantes de la Universidad del Valle de Guatemala de diversas facultades y años cursados. En dicha encuesta se colocaron preguntas relacionadas al uso de dispositivos digitales, recolectando información sobre el tiempo promedio en pantalla, el uso durante la noche y las aplicaciones más frecuentes que utilizan en el día a día. También se incluyeron preguntas acerca de la experimentación de fatiga visual, cansancio y entre otros síntomas durante el uso de la computadora y teléfono inteligente. Finalmente, se incluyó una sección que se enfocaba en estimar la cantidad de encuestados que utiliza lentes graduados y lentes con filtro de luz azul durante el uso de sus dispositivos.

### 8.2.1. Facultades y carreras

Un total de 66 respuestas fueron recopiladas, en donde el 48 % de los encuestados pertenecen a Ingeniería, el 41 % a Ciencias y Humanidades, seguido de Ciencias Sociales (5 %) y Business School (5 %) (Figura 14 (a)). La mayor parte de las respuestas pertenecen a estudiantes de Ingeniería Biomédica y Biotecnología Molecular (Figura 14 (b)).



(a) Facultades



(b) Carreras

**Figura 14.** Cantidad por facultades y carreras

### 8.2.2. Hábitos de uso

El dispositivo más utilizado es el teléfono inteligente, seguido de la computadora, para el día a día. Siendo el televisor el dispositivo menos utilizado, obteniendo un cero en respuestas (Figura 15 (a)). En general, los estudiantes estiman un tiempo de uso de más de cuatro horas al día (Figura 15 (b)), sin embargo, en la encuesta se les pidió el tiempo promedio que marca su dispositivo en configuración, obteniendo un promedio de uso real entre 6 a 8 horas durante el día. El uso de aplicaciones de trabajo es importante para un estudiante universitario, al igual que las redes sociales para la distracción durante el tiempo ocioso, entre estas aplicaciones, se determinó que Word, Google, Instagram, Tik Tok y WhatsApp son las aplicaciones más frecuentes utilizadas (Figura 15 (c)).

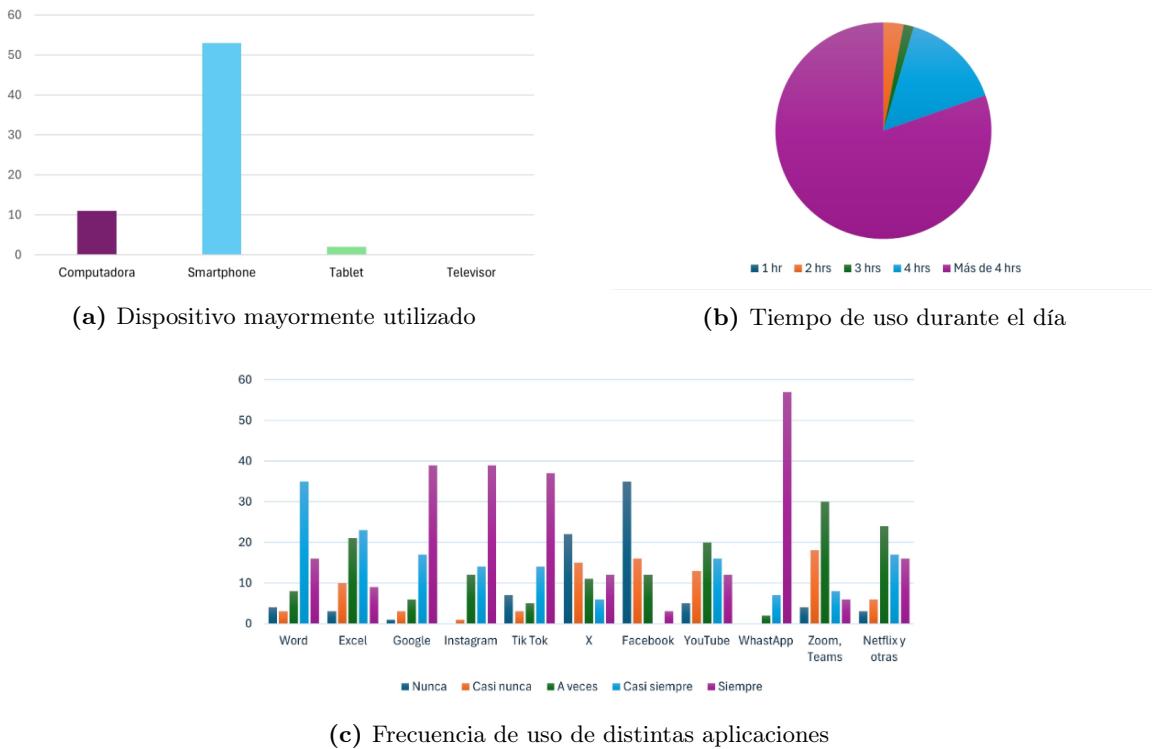
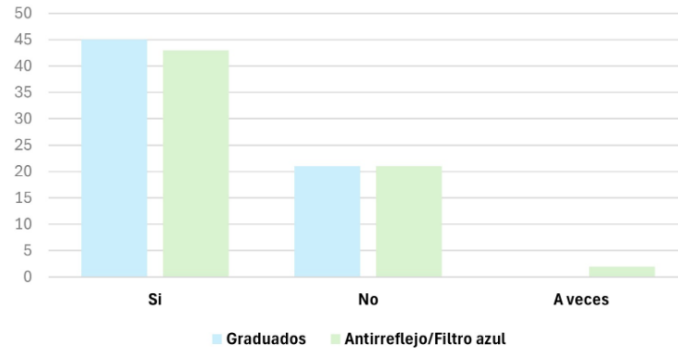


Figura 15. Hábitos de uso de los encuestados

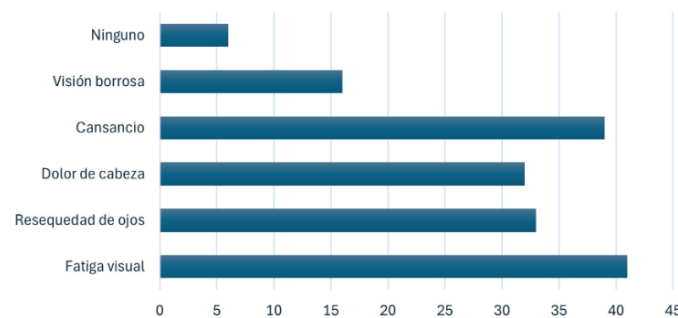
### 8.2.3. Uso de lentes graduados, antirreflejo y con filtro azul

Un 68% de los encuestados utiliza algún tipo de lentes graduados, siendo el 32% restante que no los utiliza. Con respecto al uso de lentes antirreflejo o con filtro azul, durante el uso de dispositivos, un 63% respondió que si utiliza este tipo de lentes, un 32% que no y solo un 3% los utilizan de vez en cuando (Figura 16 (a)). Cabe destacar la pregunta ".<sup>En</sup> comparación cuando comenzó la universidad, ¿Ha sentido que su visión se ha visto más afectada con el tiempo?", el 46% contestó que si, 28% que no y 26% que tal vez.

También se les preguntó acerca de los efectos visuales que pueden suceder durante el uso prolongado de pantallas y si han experimentado alguno, obteniendo que la fatiga visual, resequedad de ojos, dolor de cabeza y cansancio son los efectos más experimentados por los estudiantes (Figura 16 (b)).



(a)

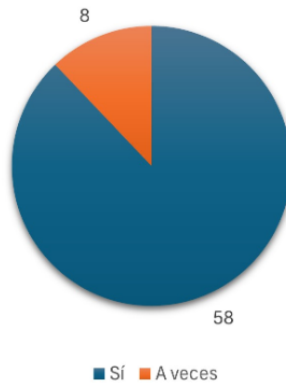


(b)

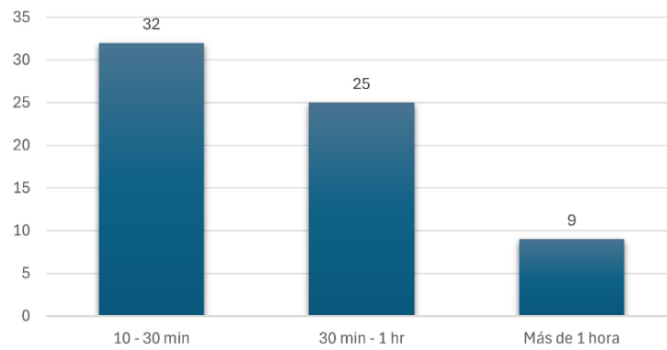
**Figura 16.** Uso de tipos de lentes y efectos visuales reportados durante el uso de pantallas digitales

#### 8.2.4. Hábitos de uso antes de dormir

Esta sección de la encuesta se enfocó en determinar los entornos de uso (luces encendidas/apagadas) de los dispositivos, al igual que el uso del teléfono antes de dormir, tiempo utilizado y empleo del modo nocturno. En general, la mayor parte de encuestados, 53%, utiliza los dispositivos con las luces apagadas, el 88% utiliza el teléfono antes de dormir (Figura 17) entre 10 - 30 minutos, y el 48% de 30 minutos a una hora de uso (Figura 18)

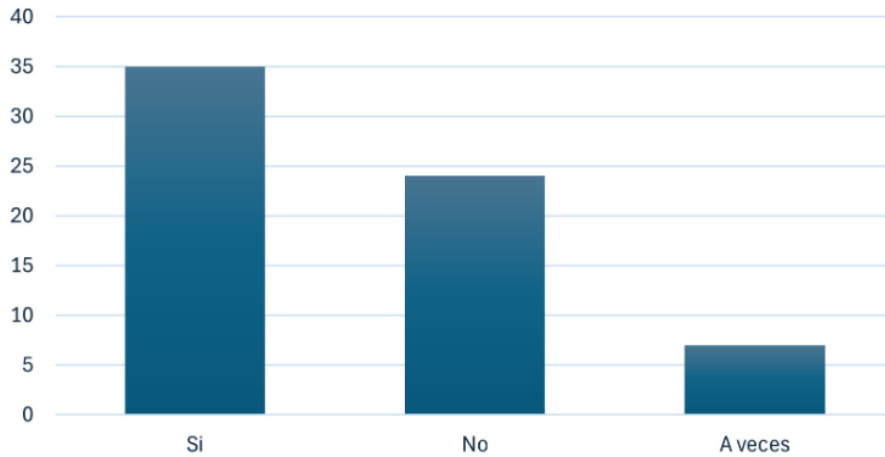


**Figura 17.** Uso de dispositivos antes de dormir



**Figura 18.** Tiempo de uso antes de dormir

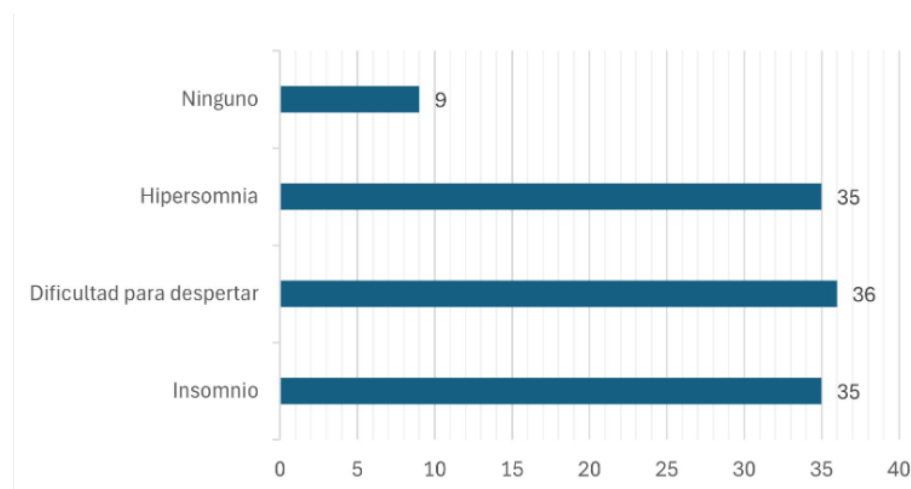
Por otro lado, 53% utiliza el modo nocturno para contrarrestar los efectos del brillo durante la noche, 36% no lo utiliza y el 11% a veces (Figura 19).



**Figura 19.** Empleo del modo nocturno (*night shift*)

### 8.2.5. Trastornos de sueño

Aunque una gran parte de estudiantes hace empleo del modo nocturno, no se determinó la hora de dormir ni el tiempo de sueño, asumiendo que un estudiante universitario descansa entre 6 a 8 horas al día, se determinaron algunos trastornos de sueño relacionados con el ritmo circadiano (Figura 20). 31 % ha experimentado dificultad para levantarse, 30 % ha padecido de insomnio y hipersomnia (sueño durante el día) y solamente el 8 % no ha experimentado algunos de los anteriores. Se les indicó a los encuestados seleccionar las opciones que aplicaran, lo que significa la prevalencia de estos trastornos en la gran mayoría de estudiantes.

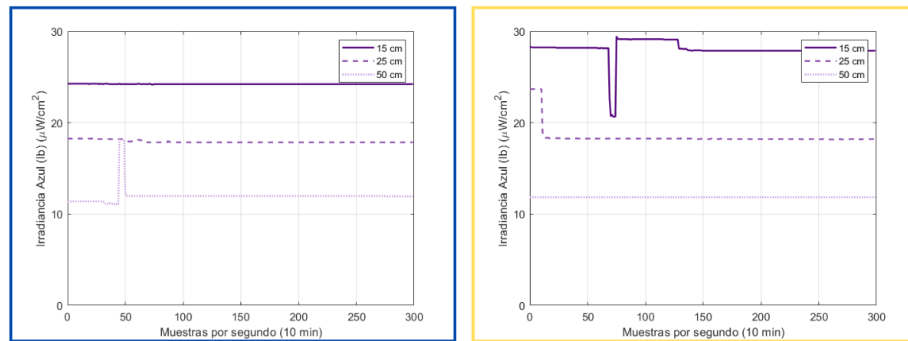


**Figura 20.** Trastorno de sueño del ritmo circadiano en estudiantes universitarios

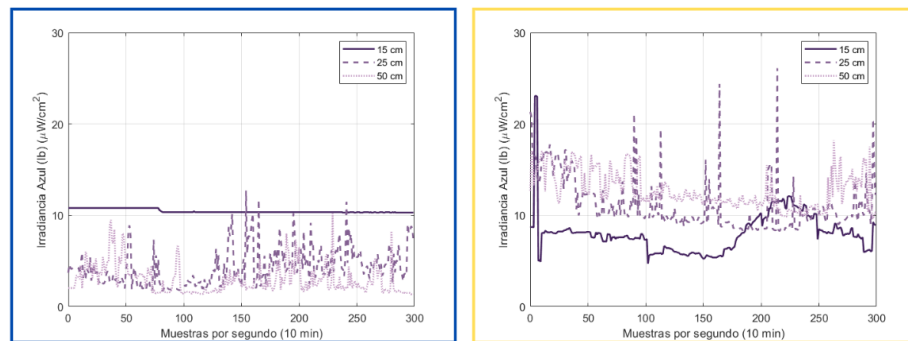
### 8.3. Tiempo real

Esta sección se basa en los resultados obtenidos en la encuesta del uso de dispositivos a estudiantes UVG (Sección 8.2).

Cada prueba realizada consistió de 10 minutos por distancia y por condiciones de iluminación, similar a la calibración. Se realizaron pruebas para la escritura de documentos en Word, utilizando un brillo del 100% en todas las distancias (Figura 21 (a)) y visualización de videos educativos en YouTube (Figura 21 (b)). Tanto en luces apagadas como encendidas, las pruebas en word superan los niveles de irradiancia en comparación con las pruebas en YouTube, alcanzado en ambos casos casi  $30 \mu W/cm^2$  de irradiancia para una distancia de 15 cm, a pesar de que las distancias media y recomendada para una computadora suponen menos niveles para la calibración, en este caso superan los  $10 \mu W/cm^2$ . Aunque las pruebas en Word obtuvieron valores altos, se puede observar una clara constancia en las mediciones, ya que esta aplicación su fondo predeterminado siempre es blanco, para los videos se observan fluctuaciones en la irradiancia pero por debajo de  $15 \mu W/cm^2$  para luces apagadas y superando los  $20 \mu W/cm^2$  para luces encendidas.



(a) Uso de Word, 100% brillo



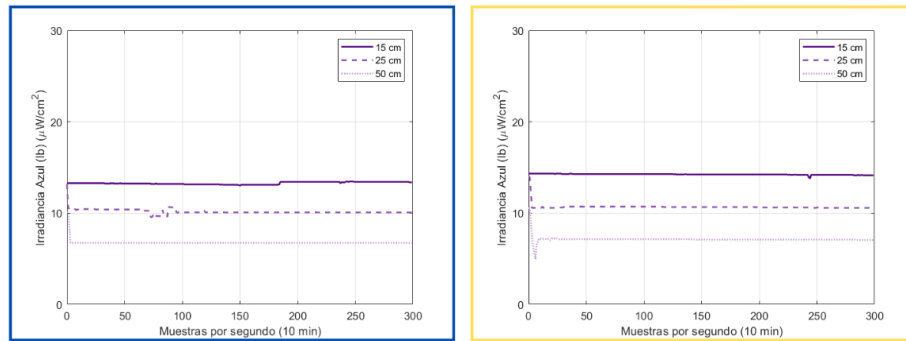
(b) Visualización videos educativos en YouTube, 90% brillo

Figura 21. Comparación entre escritura de documentos y visualización de videos

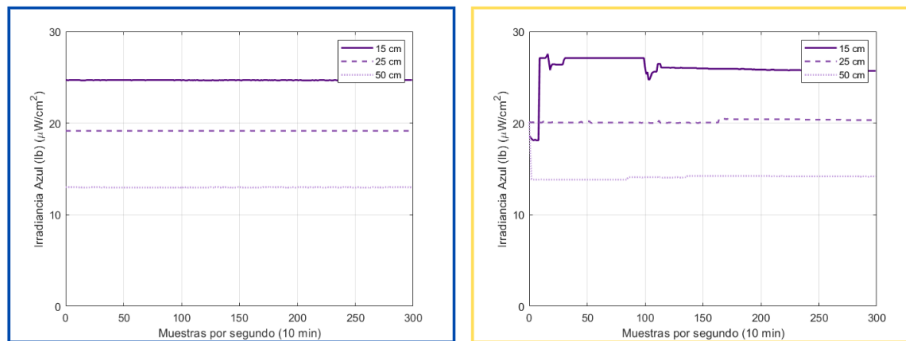
### 8.3.1. Filtros y lentes en Word

Se realizaron las pruebas en Word utilizando el modo nocturno (Figura 22 (a)) y durante el uso de lentes antirreflejo (Figura 22 (b)), para ambos casos se utilizó un brillo del 100%. Analizando y comparando el modo nocturno con el modo normal (Figura 21 (a)), los niveles de irradiancia disminuyeron un 48% para todas las distancias, siendo la distancia no recomendada de 15 cm la que obtuvo un menor valor en el modo nocturno en comparación con el modo normal, bajando de  $25 \mu W/cm^2$  a  $12 \mu W/cm^2$ . Para las pruebas con luces encendidas, se observa que que estos niveles permanecen constante e iguales a las pruebas con luces apagadas; habiendo un leve aumento con luces encendidas.

Para el uso de lentes antirreflejo (Figura 22 (b)), se puede observar como durante las pruebas con luces apagadas los niveles de irradiancia no disminuyeron en absoluto en comparación con el modo normal y el modo nocturno. Existe una consistencia en las pruebas y la irradiancia permaneció en  $25 \mu W/cm^2$  para la distancia de 15 cm, en  $19 \mu W/cm^2$  para la distancia de 25 cm y en  $12 \mu W/cm^2$  para la distancia de 50 cm. Sin embargo, en luces encendidas, la irradiancia azul para una distancia de 5 cm disminuyó de  $29 \mu W/cm^2$  (modo normal) a  $27 \mu W/cm^2$ .



(a) Uso de Word en modo nocturno, 100% brillo

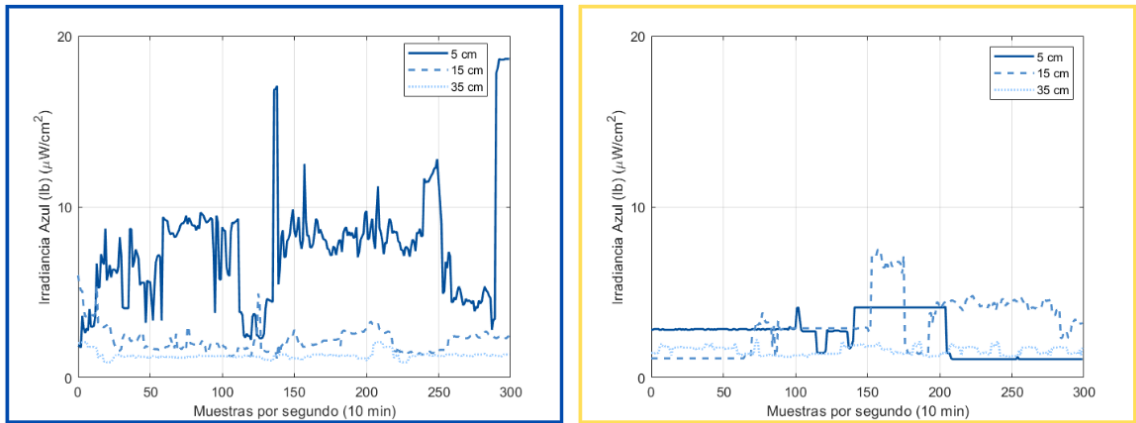


(b) Uso de Word con lentes antirreflejo, 100% brillo

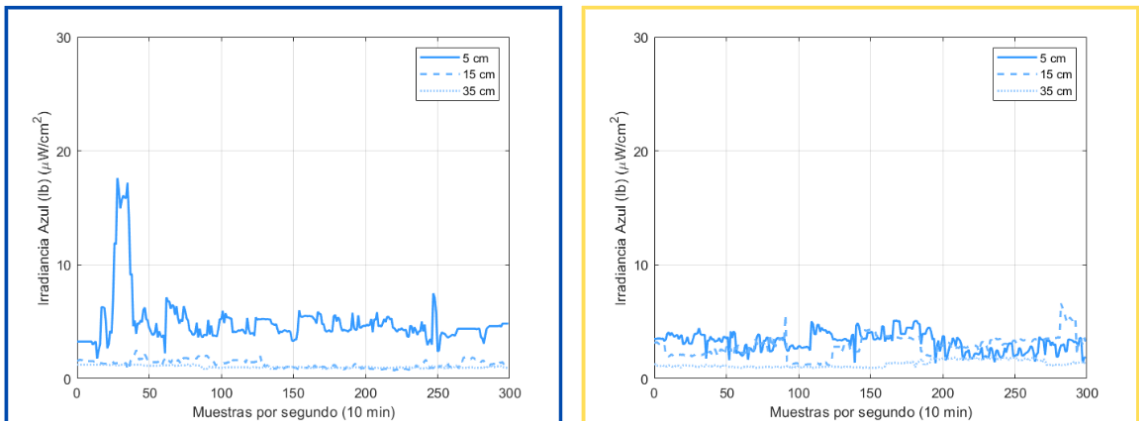
**Figura 22.** Comparación entre el modo nocturno y el uso de lentes en Word para un brillo constante del 100%

### 8.3.2. Redes sociales

Si bien es cierto que el contenido en redes sociales varía de persona a persona, existe una relación entre los fondos blancos y negros utilizados en la mayoría de videos. Realizando una comparación entre las dos redes sociales más utilizadas, Instagram y Tik Tok, se observa que para una distancia de 5 cm (no recomendada) y luces apagadas, los niveles de irradiancia para ambos casos pueden llegar a superar los  $15 \mu W/cm^2$ , teniendo varios altos y bajos en picos de irradiancia azul pero manteniendo constante la emisión. Haciendo la comparación, la aplicación de Instagram contiene los valores más altos de irradiancia para una distancia mínima (Figura 23 (a)), y cuando las luces están encendidas estos niveles disminuyen significativamente, sin superar los  $5 \mu W/cm^2$ . Para Tik Tok, sigue habiendo una predominancia para la distancia mínima durante luces apagadas aunque menor que Instagram (Figura 23 (b)), en luces encendidas se observa nuevamente como estos niveles disminuyen por debajo de  $5 \mu W/cm^2$ .



(a) Aplicación Instagram Reels 100 % brillo



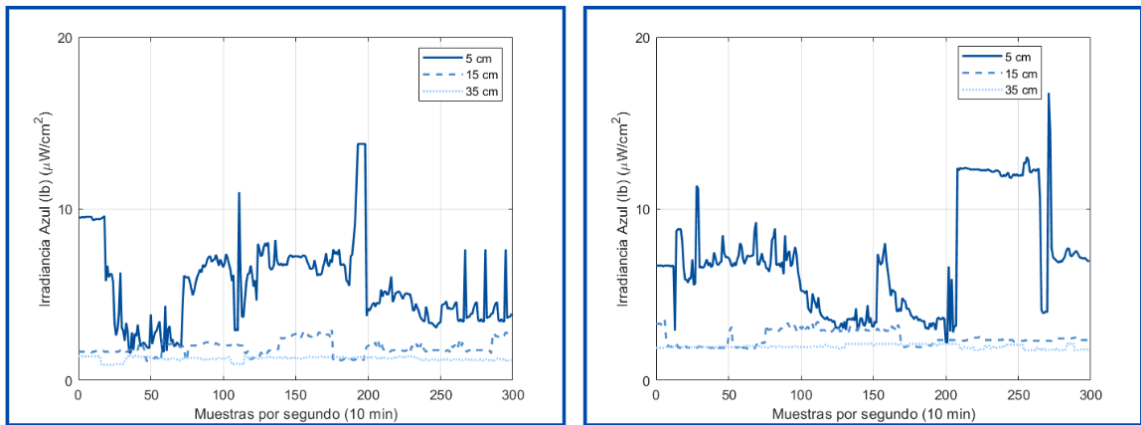
(b) Aplicación Tik Tok 100 % brillo

Figura 23. Comparación entre redes sociales

### 8.3.3. Redes sociales en modo nocturno y uso de lentes

Las pruebas en redes sociales con el modo nocturno activado y el uso de lentes se realizaron únicamente para la aplicación Instagram, al ser la más utilizada por los estudiantes encuestados, y con luces apagadas debido a una prevalencia del uso del celular durante la noche. La imagen de la izquierda (Figura 24) muestra los resultados para todas las distancias durante 10 minutos de exposición, realizado la comparación con el modo normal (Figura 23 (a)) a una distancia de 5 cm, se observa que la variación y picos de irradiancia fueron menores al emplear el modo nocturno, sin sobrepasar los  $10 \mu W/cm^2$ . Habiendo un único pico con una irradiancia de  $14 \mu W/cm^2$ . Para el resto de distancias, 15 y 35 cm, la variabilidad de la irradiancia es menor y se mantuvo por debajo de  $3 \mu W/cm^2$ .

Con respecto al uso de lentes durante las mediciones realizadas en esta aplicación, la irradiancia se mantuvo dominada por la distancia de 5 cm, con valores que oscilaron principalmente entre 5 y  $9 \mu W/cm^2$  durante la mayor parte del tiempo. En el intervalo de 100 a 200 seg, se observa una reducción de aproximadamente  $4-5 \mu W/cm^2$ , sin embargo, a partir de los 200 seg, la irradiancia vuelve a incrementarse y se observa un tramo con valores altos, alcanzando cerca de  $16 \mu W/cm^2$  a esta distancia (5 cm). En comparación, para las distancias de 15 y 35 cm, la irradiancia permaneció baja y relativamente estable, cercana a niveles entre 1 y  $2 \mu W/cm^2$ , sin picos relevantes a lo largo del tiempo. Aunque la variabilidad de la señal es menor que en el modo normal, los niveles registrados con lentes se mantienen por encima de los obtenidos en el modo nocturno.



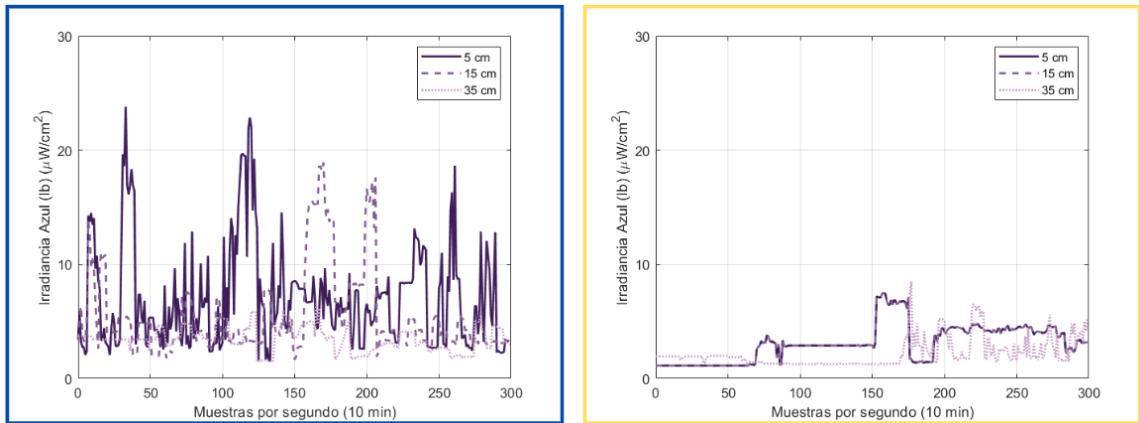
**Figura 24.** Aplicación Instagram Reels 100% brillo en modo nocturno (izquierda) y uso de lentes (derecha)

### 8.3.4. Entretenimiento

Los estudiantes universitarios indicaron un bajo uso de aplicaciones de entretenimiento, como Netflix, aunque no un uso de cero como en el caso de la televisión. Por lo tanto, se realizaron pruebas durante la visualización de una serie animada *One*

*Piece* la cual usualmente contiene altos contenidos de escenas brillantes y debido a su popularidad. En estos resultados (Figura 25) se obtuvieron niveles de irradiancia por encima de  $20 \mu W/cm^2$  para luces apagadas y nuevamente a una distancia no recomendada para la computadora. Se observa que a pesar de cambiar distancias, la irradiancia puede elevarse dependiendo del cambios constante de brillantez. Para luces encendidas se puede observar como estos niveles disminuyen drásticamente a menos de  $10 \mu W/cm^2$ .

Adicionalmente, en la condición de luces apagadas, la señal presenta picos recurrentes y variaciones rápidas asociadas a transiciones de escenas. La distancia más cercana contiene los valores máximos y los incrementos más bruscos, mientras que a distancias recomendads la irradiancia se mantiene en rangos menores aunque con variaciones visibles. En la condición de luces encendidas, además de la reducción clara de la irradiancia, la serie temporal muestra una variabilidad menor y una disminución de picos, manteniéndose cercana a un rango estable durante la medición.

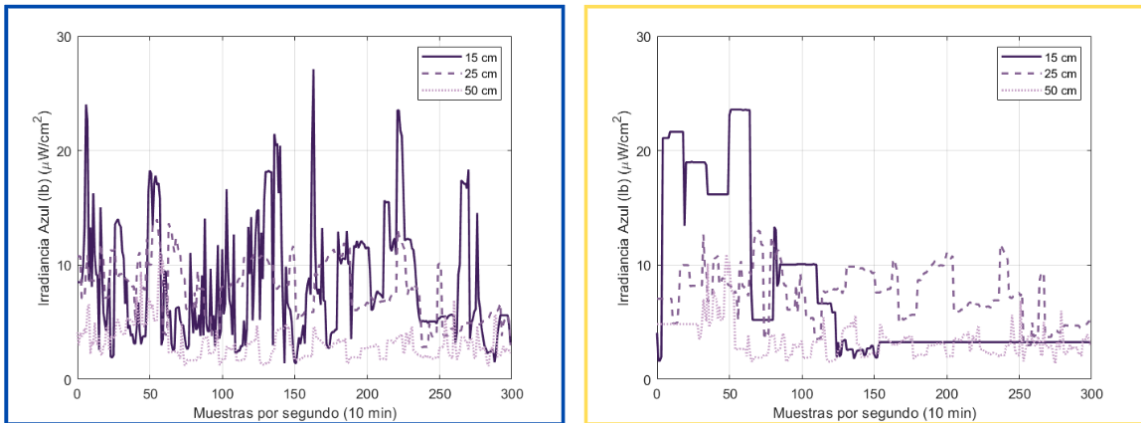


**Figura 25.** Visualización de serie animada *One Piece*, 100% de brillo

### 8.3.5. Entretenimiento con modo nocturno

Se evaluó el mismo episodio utilizado para las mediciones en modo normal de una serie animada en computadora, ahora bajo el modo nocturno (Figura 26). A pesar de que en secciones previas el modo nocturno mostró un reducción general de la irradiancia, en este caso dicha disminución no se aprecia de forma uniforme a lo largo del periodo de tiempo medido. Para la distancia de 15 cm, con luces apagadas, la irradiancia se mantuvo elevada y con alta variabilidad durante gran parte de la medición, con valores que se distribuyen mayormente entre  $5$  y  $15 \mu W/cm^2$  y picos que alcanzaron aproximadamente  $25$ - $27 \mu W/cm^2$ , especialmente en los primeros 200 seg. A 25 cm, se observan valores intermedios, con oscilaciones frecuentes alrededor de  $6$ - $12 \mu W/cm^2$  y picos cercanos a  $12$ - $14 \mu W/cm^2$ . En la distancia de 50 cm la señal permaneció baja en comparación con las demás, cerca de  $2$ - $5 \mu W/cm^2$  y con aumentos moderados.

Al comparar las dos gráficas resaltadas en amarillo (luces encendidas) de los modos normal (Figura 25) y el modo nocturno (Figura 26), el modo normal muestra irradiancias generalmente bajas y estables, alrededor de  $1-2 \mu W/cm^2$  y aumentos moderados. Para el modo nocturno, esta presenta niveles más altos desde el inicio de las mediciones, especialmente a 15 cm, con varios escalones que superan los  $15-20 \mu W/cm^2$ . El modo nocturno muestra fluctuaciones más frecuentes. De la misma manera, la distancia más cercana, 15 cm, predomina en comparación con el resto de distancias, sin embargo, se observa una separación clara entre ellas. En conjunto, el modo normal refleja un patrón más estable y consistente, mientras que el modo nocturno evidencia mayor intensidad y dispersión a lo largo del tiempo.



**Figura 26.** Visualización de serie animada *One Piece*, 100% de brillo en modo nocturno

El objetivo de este estudio fue desarrollar un sistema de medición de luz azul mediante el sensor TCS34725 y evaluar la irradiancia emitida por diferentes dispositivos electrónicos en condiciones reales de uso. El objetivo general fue determinar la magnitud de exposición a luz azul a la que se enfrentan los estudiantes universitarios, así como analizar los posibles efectos oculares y circadianos. En esta sección se interpretan los principales hallazgos obtenidos en las calibraciones, las pruebas en tiempo real y la encuesta dirigida a estudiantes de la Universidad del Valle de Guatemala.

Los resultados experimentales de calibración mostraron un incremento progresivo de la irradiancia en el canal azul conforme aumentó el nivel de brillo de los dispositivos y disminuyó la distancia (Figuras 11-13), y esto nuevamente se comprobó en los resultados en tiempo real (Sección 8.3) (Figuras 21-26). Este comportamiento se atribuye a la mayor densidad de flujo luminoso que incide directamente sobre el sensor, fenómeno coherente con el principio de la ley del cuadrado inverso, según la cual la intensidad luminosa disminuye proporcionalmente a la distancia [18].

Se observó que la computadora presentó las irradiancias más altas entre los tres dispositivos evaluados, lo cual puede explicarse por su uso a distancias menores y pantallas con mayor intensidad de píxeles, presetando una constante exposición de irradiancia mayor a  $25 \mu W/cm^2$  para la escritura de documentos en Word en el modo normal. En contraste, el televisor registró los valores más bajos (Figura 13), dado que la distancia recomendada de visualización reduce significativamente la energía óptica incidente. Estos hallazgos concuerdan con estudios previos [26] que documentan una mayor exposición a la luz azul en dispositivos a corta distancia, especialmente en entornos oscuros.

Por otro lado, el teléfono inteligente presentó también una mayor variabilidad y

fluctuaciones de la irradiancia en cuanto al uso de redes sociales, especialmente la aplicación Instagram (Figura 23). Estos resultados pueden variar según el dispositivo (modelo, tamaño, marca) y el contenido sugerido para cada individuo. La alta variabilidad puede explicarse por el constante desplazamiento de contenido durante las mediciones. Estos hallazgos sugieren que, bajo condiciones de uso típicas, tanto los teléfonos inteligentes como las computadoras puede emitir niveles de luz azul que superan los valores de referencia establecidos para exposiciones prolongadas.

Aunque la IEC 62471 define sus límite en función de la radiancia ponderada y no exclusivamente irradiancia absoluta [31], el hecho de que los valores medidos excedan los  $10 \mu W/cm^2$  indica que determinadas combinaciones de brillo, distancias y tipo de contenido podrían situar a los usuarios en rangos cercanos o superiores a los umbrales de riesgo fotobiológico. La comparación puede sugerir que en situaciones reales de uso, especialmente aquellas que implican contenido dinámico o alto brillo, podrían generar exposiciones que pueden ser consideradas dentro del marco de seguridad visual establecido por la norma.

En el modo nocturno (*night shift*), las mediciones confirmaron una reducción promedio de entre 20 % y 40 % en la irradiancia del canal azul para el teléfono inteligente y la computadora, dependiendo del brillo y la distancia. Sin embargo, el filtrado no fue total, indicando que aún persiste una fracción significativa del espectro azul incluso bajo configuraciones de luz cálida, especialmente durante las pruebas realizadas a la computadora (Figura 26). Esta tendencia coincide con lo reportado en [27], donde se señala que los filtros digitales y ópticos atenúan parcialmente la emisión de luz azul, pero no eliminan su componente de alta energía.

El uso de lentes con filtro azul también demostró una baja disminución de la irradiancia medida, respaldando su efectividad parcial como medida preventiva frente a la exposición prolongada [3]. No obstante, la magnitud de reducción depende del material y recubrimiento del lente [6], lo cual sugiere la necesidad de estudios complementarios para comprobar su eficacia.

Durante las pruebas en tiempo real, que simularon escenarios típicos de uso de dispositivos por estudiantes universitarios, trabajos académicos en computadora, uso de redes sociales en teléfono y visualización de contenido audiovisual en computadora, se confirmó que las aplicaciones de redes sociales generan picos de irradiancia más altos y frecuentes, debido al predominio de fondos blancos y movimientos dinámicos en pantalla (Figura 23). Este patrón sugiere que el diseño de estas aplicaciones puede aumentar la carga luminosa azul percibida.

De la misma manera, se observó que el uso de dispositivos en entornos de baja iluminación ambiental incrementa el contraste y la sensibilidad ocular, potenciando el impacto visual (Figura 16) de la luz azul y los efectos en el sueño de las personas (Figura 20), respaldando los estudios realizados que demostraron que la exposición nocturna a la luz azul suprime la secreción de melatonina [37] y altera el ritmo circadiano del sueño [27].

El análisis comparativo entre condiciones con y sin iluminación mostró diferencias

notables en la respuesta del sensor, lo que evidencia la importancia del entorno en la exposición real. Las mediciones más elevadas se obtuvieron con luces apagadas (Secciones 8.1 y 8.3), situación frecuente entre usuarios que utilizan sus teléfonos antes de dormir (Figura 17), lo cual refuerza la relación entre los hábitos de uso y el potencial riesgo visual, y la prevalencia de trastornos del ritmo circadiano asociados.

La encuesta aplicada a estudiantes reveló que más del 70 % de los participantes utiliza el teléfono inteligente por más de 4 horas diarias, principalmente en horarios nocturnos y en entornos de poca luz. Asimismo, una mayoría reportó síntomas visuales como fatiga ocular, resequedad y visión borrosa (Figura 16 (b)), lo cual coincide con los incrementos de irradiancia observados experimentalmente en las pruebas con brillo alto, distancias cortas y en entornos de poca iluminación. Por otro lado, se registró que el 68 % de los encuestados utiliza algún tipo de lentes graduados (Figura 16 (a)), lo cual aumenta la preocupación del cuidado de la salud visual en jóvenes menores de 26 años de edad.

Los resultados sugieren una coherencia entre el comportamiento lumínico medido y las experiencias reportadas por los usuarios, reforzando la posible relación entre la exposición a la luz azul, alteraciones de la visión y el ritmo circadiano. Aunque el estudio no abordó medidas fisiológicas directas, los datos experimentales y las respuestas en la encuesta otorgan una base sólida para futuras investigaciones.

Entre las principales limitaciones del estudio se encuentra el uso de un único sensor (TCS34725) y la falta de calibración con un espectrómetro de referencia, lo que restringe la exactitud absoluta de las mediciones. Además, no se evaluaron las longitudes de onda fuera del rango azul, lo cual impide estimar la irradiancia total de la pantalla. Tampoco se consideraron diferencias en tecnología de panel (LCD, OLED, LED) que podrían influir en la distribución espectral de cada dispositivo.

Aunque el TCS34725 es adecuado para estimar la irradiancia en el canal azul, no tiene la capacidad espectral precisa, ya que se basa en fotodiodos con filtros de banda ancha para los colores RGB. Esto quiere decir que la medida de la irradiancia azul no es tan precisa como la que podría ofrecer un espectrómetro de alta resolución. El sensor no mide longitudes de onda por debajo de los 400 nm (luz ultravioleta), que también contribuyen al riesgo de daño ocular. Finalmente, el brillo de las pantallas utilizadas puede variar según el modelo y la configuración de cada dispositivo, lo que afecta los valores de irradiancia medidos.

Sin embargo, el diseño experimental permitió establecer relaciones sólidas entre distancias, brillo y modo de visualización, logrando un modelo funcional que puede ser replicado y mejorado en futuros estudios con instrumentos más precisos y poblaciones más amplias.

Se cumplió el objetivo general de desarrollar un sistema de medición de luz azul mediante el sensor TCS34725 y un microcontrolador ESP32, capaz de registrar y transformar las señales luminosas en valores de irradiancia ( $\mu W/cm^2$ ). El sistema demostró estabilidad, sensibilidad y capacidad de diferenciación entre condiciones experimentales, validando su utilidad para estudios de exposición lumínica. No obstante, la respuesta del sensor no se puede comparar con la precisión de un espectrómetro, debido a su enfoque en la diferenciación de colores RGB.

Se logró cumplir con el objetivo de medir y caracterizar la luz azul que generan diversos dispositivos electrónicos convencionales, realizando pruebas relacionadas con el uso que les dan los estudiantes universitarios en un ambiente controlado. Determinando que el teléfono inteligente es el mayor emisor de luz azul en comparación con la computadora y el televisor, debido a su uso prolongado durante el día, en entornos oscuros y distancias cortas con altos niveles de brillo.

En cuanto al objetivo de evaluar la eficacia de los lentes antirreflejo y con filtro azul en relación con la protección que brindan ante la luz azul se logró cumplir parcialmente debido a los resultados obtenidos, ya que según estos, este tipo de lentes no ayudan a disminuir las emisiones de luz azul por completo, más bien reducir parcialmente su impacto. Aunque esto depende del modelo, tipo de lente y fabricante, los utilizados en este estudio resaltan un incremento en la exposición y disminuyen parcialmente para algunos de los dispositivos evaluados. Por lo tanto, la eficacia de estos se puede concluir que resultó ser mínima. Sin embargo, se logró demostrar que el uso del modo nocturno es un método efectivo para disminuir los niveles de exposición a irradiancia azul durante el uso de ciertas aplicaciones y dispositivos, especialmente para el teléfono inteligente.

Finalmente, el trabajo cumplió con su propósito de responder al problema original, al ofrecer evidencia experimental sobre cómo los parámetros de brillo, distancia y entorno influyen en la exposición a luz azul. Se concluye que, aunque las tecnologías

actuales incorporan filtros y modos de protección ocular, la exposición prolongada y en entornos de poca iluminación, sigue representando un riesgo potencial, lo que resalta la necesidad de fomentar hábitos visuales saludables en la población universitaria.

Aunque el sistema desarrollado logró medir con precisión una estimación de la irradiancia de luz azul emitida por dispositivos digitales, resulta necesario avanzar hacia una validación biológica de los resultados. Para ellos, se recomienda establecer correlaciones entre los niveles de irradiancia registrados y parámetros fisiológicos medibles, tales como la fatiga visual, la dilatación pupilar o las alteraciones del ritmo circadiano. Este tipo de validación podría llevarse a cabo mediante estudios experimentales controlados con voluntarios, en donde se monitoreen variables biológicas y se evalúe el efecto de la exposición a diferentes intensidades y distancias. La ampliación de la muestra a una población más grande de estudiantes universitarios, e incluso fuera de este grupo, permitiría obtener datos más robustos y generalizables, fortaleciendo el vínculo entre las mediciones físicas y las respuestas biológicas reales.

Por otro lado, dado que el sistema implementado en este estudio corresponde a un prototipo inicial, se propone la creación de un modelo compacto y portátil que permita un uso más versátil. Este diseño podría orientarse hacia el desarrollo de un dispositivo tipo wearable, capaz de fijarse a distintos dispositivos electrónicos o ser utilizado por los usuarios para registrar su exposición diaria acumulada a la luz azul. Incorporar sensores de proximidad, giroscopios o módulos de comunicación inalámbrica (por ejemplo, Bluetooth o wifi) ampliaría la funcionalidad del sistema, permitiendo obtener mediciones más precisas respecto a la distancia real y los movimientos del usuario frente a la pantalla. Un modelo de estas características no solo aumentaría la exactitud de las mediciones, sino que también facilitaría la recolección de datos en entornos cotidianos, fuera del ambiente controlado, acercando el experimento a condiciones de uso reales.

Otra línea de mejora relevante consiste en optimizar la calibración y trazabilidad del sensor empleado. Implementar un proceso de comparación frente a equipos de referencia, como espectrómetros calibrados, permitiría reducir el margen de error y determinar la incertidumbre asociada a las mediciones. De igual forma, incluir

filtros ópticos o algoritmos de compensación térmica aumentaría la confiabilidad del sistema ante diferentes condiciones ambientales. Esto resultaría especialmente útil para estudios comparativos entre tecnologías de pantalla (LCD, OLED, MiniLED), en los que se requiere una alta sensibilidad.

También se recomienda integrar métricas estandarizadas para el análisis del impacto de la luz azul, tales como el índice de peligro de luz azul (BLH) o el factor de toxicidad por luz azul (BLTF), siguiendo los estándares propuestos por la Comisión Internacional de Iluminación (CIE). Estas métricas permitirían interpretar los resultados en términos fisiológicamente relevantes y compararlos con los límites de exposición recomendados en la literatura científica. De igual forma, podría considerarse el cálculo de la dosis acumulada de exposición ( $J/cm^2$ ), lo cual daría una perspectiva temporal del riesgo asociado al uso prolongado de pantallas.

Finalmente, se propone realizar intervenciones educativas y tecnológicas que promuevan hábitos visuales saludables en estudiantes y profesionales expuestos a largas jornadas frente a las pantallas digitales. Esto podría incluir la evaluación de filtros físicos, modos nocturnos o recordatorios digitales que fomenten descansos periódicos. Implementar estas medidas, junto con el desarrollo de herramientas de monitoreo basadas en el sistema diseñado, permitiría no solo prevenir los posibles efectos negativos de la luz azul, sino también generar conciencia sobre el uso responsable de los dispositivos digitales.

En conjunto, estas recomendaciones de trabajo futuro fortalecerían la validez científica del estudio y ampliarían su impacto social, abriendo el camino hacia la creación de un sistema de monitoreo portátil y confiable, capaz de integrar el análisis de exposición lumínica con la evaluación de efectos fisiológicos reales en el ser humano.

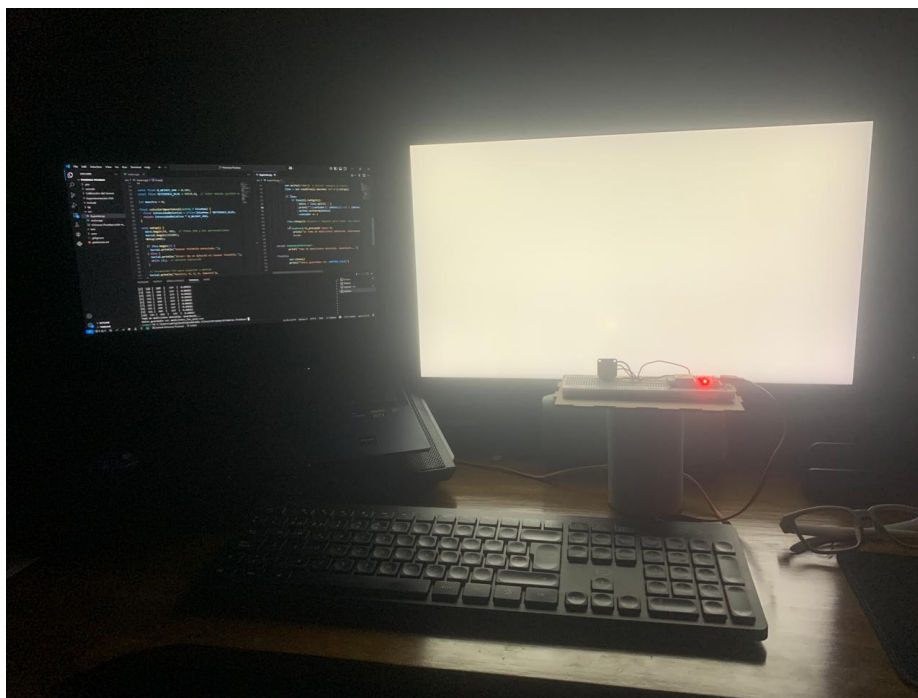
- [1] Peña G. Dainy A. *Equipos de Medicion Luminotecnia | PDF | Encendiendo | Diodo emisor de luz*. Mayo de 2019. URL: <https://es.scribd.com/document/411538859/Equipos-de-Medicion-Luminotecnia>.
- [2] Andrew J. Zele y Dingcai Cao. «Vision under mesopic and scotopic illumination». En: *Frontiers in Psychology* 5 (ene. de 2015), pág. 122487. ISSN: 16641078. DOI: 10.3389/FPSYG.2014.01594/FULL. URL: [www.frontiersin.org](http://www.frontiersin.org).
- [3] Laura Pérez Plaza. *Blue light filters in optometric practices*. Inf. téc. Universidad de Zaragoza, 2020. URL: <https://zaguan.unizar.es/record/110367/files/TAZ-TFG-2021-2890.pdf>.
- [4] Bolle. *8 maneras de protegerse contra la luz azul dañina de las pantallas*. 2017. URL: <https://www.bolle-safety.com/es/insights/8-ways-to-protect-yourself-from-harmful-blue-light-of-screens.html#:~:text=Las%20gafas%20de%20buena%20calidad,horas%20frente%20a%20la%20pantalla..>
- [5] Anna Katarzyna Talaga y Xiaolin Gu. *Blue Light Filtering IOLs and Ocular Health White Paper*. Inf. téc. Alcon Medical Affairs, 2019. URL: [https://www.us.alconscience.com/sites/g/files/rbvwei1736/files/pdf/1905A341-US-NIQ-19-E-0347a\\_IOLS-and-Blue-Light-White-Paper\\_single-page\\_iPad.pdf](https://www.us.alconscience.com/sites/g/files/rbvwei1736/files/pdf/1905A341-US-NIQ-19-E-0347a_IOLS-and-Blue-Light-White-Paper_single-page_iPad.pdf).
- [6] Wing Leung, Roger Wing-Hong y Chea-Su Kee. «Lentes para gafas con filtro de luz azul: rendimiento óptico y clínico». N/A. Ene. de 2017. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28045969/>.
- [7] Hunky Seo et al. «Smart Contact Lenses as Wearable Ophthalmic Devices for Disease Monitoring and Health Management». En: *Chemical Reviews* 123 (19 oct. de 2023), págs. 11488-11558. ISSN: 15206890. DOI: 10.1021/ACS.CHEMREV.3C00290/ASSET/IMAGES/LARGE/CR3C00290\_0025.JPEG. URL: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.chemrev.3c00290>.
- [8] Calrs Zeiss. «10 hechos sobre cómo la luz azul puede perjudicar a los ojos». En: *Carl Zeiss Vision International* (2020).

- [9] Nikita A. Wong y Hamed Bahmani. «A review of the current state of research on artificial blue light safety as it applies to digital devices». En: *Heliyon* 8 (8 ago. de 2022), e10282. ISSN: 2405-8440. DOI: 10.1016/J.HELIYON.2022.E10282. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844022015705>.
- [10] Ola. A. «¿Han aumentado los casos de miopía en niños por el uso de pantallas digitales?» En: *PrensaLibre* (mar. de 2023). URL: <https://www.prensalibre.com/guatemala/comunitario/han-aumentado-los-casos-de-miopia-en-ninos-por-el-uso-de-pantallas-digitales/>.
- [11] Vicario. M. *Efectos de la luz azul en la salud ocular*. Inf. téc. UPC, 2025. URL: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/365425/TFG%20MONICA%20VICARIO.pdf?sequence=11&isAllowed=y>.
- [12] Álvaro Rodríguez Vega y Leonidas Traipe Castro. «Síndrome visual informático: manejo actual basado en la evidencia». En: *Revista Médica Clínica Las Condes* 34 (5 sep. de 2023), págs. 315-321. ISSN: 0716-8640. DOI: 10.1016/J.RMCLC.2023.08.001. URL: <http://www.elsevier.es/es-revista-revista-medica-clinica-las-condes-202-articulo-sindrome-visual-informatico-manejo-actual-S071686402300069X>.
- [13] Shadab Rahman et al. «Effects of Filtering Visual Short Wavelengths During Nocturnal Shiftwork on Sleep and Performance». En: *National Library of Medicine* (jul. de 2013). URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3786545/#:~:text=In%20summary%2C%20the%20present%20study,day%20after%20consecutive%20night%20shifts..>
- [14] Jin tao Chen y Hai jian Wu. «Blue light from electronic devices may be an important factor for vitreous floaters». En: *Medical Hypotheses* 139 (jun. de 2020), pág. 109698. ISSN: 0306-9877. DOI: 10.1016/J.MEHY.2020.109698. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306987720303856>.
- [15] A. Krigel et al. «Light-induced retinal damage using different light sources, protocols and rat strains reveals LED phototoxicity». En: *National Library of Medicine* 339 (dic. de 2016), págs. 296-307. ISSN: 0306-4522. DOI: 10.1016/J.NEUROSCIENCE.2016.10.015. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27751961/>.
- [16] CESAR's Booklet. «El espectro electromagnético CESAR's Booklet». En: *CESAR's Booklet* (2025). URL: [https://cesar.esa.int/upload/201807/espectro\\_electromagnético\\_booklet.pdf](https://cesar.esa.int/upload/201807/espectro_electromagnético_booklet.pdf).
- [17] Bernardo Fontal. *El Espectro Electromagnético y sus Aplicaciones VII Escuela Venezolana Para la Enseñanza de la Química*. Inf. téc. Escuela Venezolana Para la Enseñanza de la Química, ago. de 2017. URL: [https://www.researchgate.net/publication/228871821\\_El\\_Espectro\\_Electromagnetico\\_y\\_sus\\_Aplicaciones](https://www.researchgate.net/publication/228871821_El_Espectro_Electromagnetico_y_sus_Aplicaciones).
- [18] ScienceDirect. *Inverse Square Law - an overview | ScienceDirect Topics*. 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/inverse-square-law>.
- [19] Dr. Ralph Chu. *¿Qué es la luz azul?* URL: <https://eyesafe.com/bluelight/>.
- [20] Friess. D y Zhu. D. *Defining Blue Light Requirements for Digital Displays*. Inf. téc. eyesafe, 2022. URL: <https://eyesafe.com/pdfs/Eyesafe-Display-Requirements-20-RPF-Whitepaper-FINAL.pdf>.

- [21] Enrique Graue y Wiechers Capítulo. «El ojo: estructura y función». En: *Curso de Anatomía* (ene. de 2009). URL: <https://www.studocu.com/latam/document/colegio-universitario-de-rehabilitacion-may-hamilton/anatomia/el-ojo-estructura-y-funcion/82205346>.
- [22] Gregorie. A Merie. B et al. «Blue Light Exposure: Ocular Hazards and Prevention—A Narrative Review». En: *Ophthalmology and Therapy* 2023 12:2 12 (2 feb. de 2023), págs. 755-788. ISSN: 2193-6528. DOI: 10.1007/S40123-023-00675-3. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40123-023-00675-3>.
- [23] Christopher Höhn et al. «Preliminary Results: The Impact of Smartphone Use and Short-Wavelength Light during the Evening on Circadian Rhythm, Sleep and Alertness». En: *Clocks & Sleep* 2021, Vol. 3, Pages 66-86 3 (1 ene. de 2021), págs. 66-86. ISSN: 2624-5175. DOI: 10.3390/CLOCKSSLEEP3010005. URL: <https://www.mdpi.com/2624-5175/3/1/5/htm%20https://www.mdpi.com/2624-5175/3/1/5>.
- [24] Manuel Ángeles-Castellanos et al. «Trastornos circadianos del sueño». En: *Revista de la Facultad de Medicina de la UNAM* (2023). DOI: 10.22201/fm.24484865e.2023.66.2.06. URL: <http://doi.org/10.22201/fm.24484865e.2023.66.2.06>.
- [25] CUV. *Qué es el núcleo supraquiasmático. Diccionario médico. Clínica U. Navarra*. 2024. URL: <https://www.cun.es/diccionario-medico/terminos/nucleo-supraquiasmatico>.
- [26] Christian Cajochen et al. «High Sensitivity of Human Melatonin, Alertness, Thermoregulation, and Heart Rate to Short Wavelength Light». En: *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism* 90 (3 mar. de 2005), págs. 1311-1316. ISSN: 0021-972X. DOI: 10.1210/JC.2004-0957. URL: <https://dx.doi.org/10.1210/jc.2004-0957>.
- [27] Amy L. Sheppard y James S. Wolffsohn. *Digital eye strain: Prevalence, measurement and amelioration*. Abr. de 2018. DOI: 10.1136/bmjophth-2018-000146. URL: [https://www.researchgate.net/publication/324556803\\_Digital\\_eye\\_strain\\_Prevalence\\_measurement\\_and\\_amelioration](https://www.researchgate.net/publication/324556803_Digital_eye_strain_Prevalence_measurement_and_amelioration).
- [28] M. E. Erro y B. Zandio. «Las hipersomnias: diagnóstico, clasificación y tratamiento». En: *Anales del Sistema Sanitario de Navarra* 30 (1 2007), págs. 113-120. ISSN: 1137-6627. URL: [https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S1137-66272007000200010&lng=es&nrm=iso&tlng=es](https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1137-66272007000200010&lng=es&nrm=iso&tlng=es).
- [29] Marcia Ines Silvani, Robert Werder y Claudio Perret. «The influence of blue light on sleep, performance and wellbeing in young adults: A systematic review». En: *Frontiers in Physiology* 13 (ago. de 2022), pág. 943108. ISSN: 1664042X. DOI: 10.3389/FPHYS.2022.943108/BIBTEX. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36051910/>.
- [30] Liesse Andrea Cadena Ramírez y Luisa Fernanda Niño Manosalva. «Comparación de resistencia al impacto en lentes oftálmicos con índice de refracción 1.67 con y sin tratamiento anti-reflejo». En: *N/A* (2015). URL: <https://ciencia.lasalle.edu.co/optometria/213>.
- [31] candelTEC. *Seguridad fotobiológica: norma IEC 62471*. Mayo de 2016. URL: <https://www.candeltec.es/seguridad-fotobiologica-norma-iec-62471>.
- [32] Texas Advanced Optoelectronic Solutions. *TCS34725 RGB Colour Recognition Sensor Module*. Ago. de 2012. URL: <https://tronic.lk/product/tcs3472-rgb-colour-recognition-sensor-module-for-arduino?srsId=https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/TCS34725.pdf>.

- [33] ADEN. *Ubicación y distancia adecuadas de TV, PC y tablet para cuidar nuestra salud*. Jun. de 2025. URL: <https://www.asociacionaden.com/noticias/ubicacion-y-distancia-adecuadas-de-tv-pc-y-tablet-para-cuidar-nuestra-salud/>.
- [34] Samsung. *¿Cuál es la distancia recomendada para ver mi televisor?* Nov. de 2025. URL: <https://www.samsung.com/es/support/tv-audio-video/cual-es-la-distancia-recomendada-para-ver-mi-television/>.
- [35] ZIRES. *¿Cuál es realmente la distancia adecuada para las pantallas?* Mayo de 2024. URL: <https://opticazires.es/blog/distancia-adecuada-para-pantallas/>.
- [36] Ergosistema. *Ergonomía de la pantalla de ordenador*. 2025. URL: <https://ergosistema.com/pantalla/>.
- [37] Front.Physiol. «La influencia de la luz azul en el sueño, en el rendimiento y el bienestar de los adultos: una revisión sistemática». En: *Fronties* (ago. de 2022). URL: <https://www.frontiersin.org/journals/physiology/articles/10.3389/fphys.2022.943108/full>.

## 13.0.1. Calibraciones



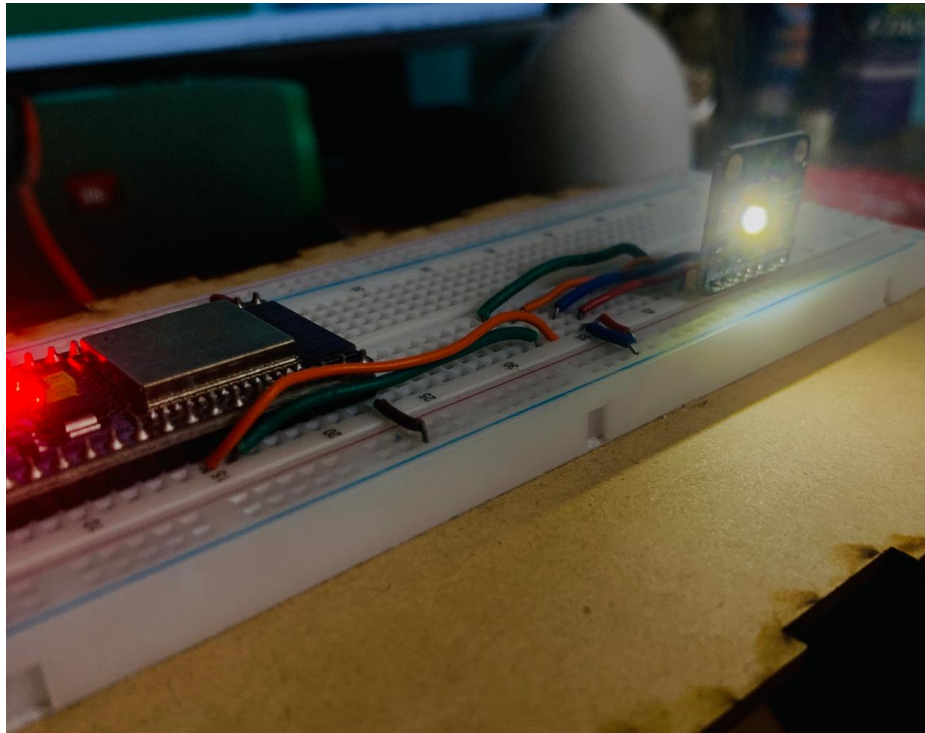
**Figura 27.** Ejemplo de calibración, computadora/monitor

## 13.0.2. Toma de mediciones en tiempo real



**Figura 28.** Visualización de contenido audiovisual

### 13.0.3. Prototipo



**Figura 29.** Armado del prototipo

#### 13.0.4. Entretenimiento



Figura 30. Toma durante experimentación

#### 13.0.5. Encuesta



Figura 31. QR de encuesta realizada a estudiantes