BIOMEDICA

Recibido 25 Jun. 2025 *ReCIBE, Año 14 No. 3, Dic. 2025*

Aceptado 29 Sep. 2025

Implementación de sistema para el estudio de reflejos pupilares con estímulos de colores azul y blanco.

Implementation of a system for the study of pupillary reflexes using blue and white color stimuli.

Rodrigo Hernandez Moncayo[1]

rhernandezm403@alumno.uaemex.mx

Asdrúbal López Chau

Carlos Omar González Morán

Ernesto Suaste Gómez

Jose de Jesus Agustin Flores Cuautle

Juan Carlos Belen Luna

[1] C.U. UAEMEX Valle de México

Resumen: El presente trabajo describe la implementación de un sistema de video-oculografía (VOG) y pupilometría para medir reflejos pupilares en 20 voluntarios (21 ± 3 años) bajo estímulos de luz azul y blanca en un ambiente controlado, aunque es una muestra muy pequeña los resultados demuestran que el sistema puede ser útil para obtener datos pupilares teniendo una evaluación positiva tanto el sistema como la infraestructura empleada. Se utilizaron tres estímulos de 10 ms con intervalos de 10 s, registrando áreas pupilares entre 3000 y 9000 píxeles, con contracciones máximas de 3000-5000 píxeles. Los resultados muestran que la luz azul induce contracciones ligeramente más pronunciadas (PCA promedio: 444-449 píxeles²) que la luz blanca (PCA promedio: 410-417 píxeles²), con una disminución en la respuesta pupilar post-iluminación (PIPR) en el tercer ciclo debido a fatiga de las células ganglionares intrínsecamente fotosensibles (ipRGCs). Este sistema proporciona una base de datos preliminar para futuros estudios con inteligencia artificial, para identificar biomarcadores potenciales para desordenes oculares del sistema parasimpático.

Palabras clave: Pupilometría, reflejo pupilar, luz azul, luz blanca, video-oculografía, ipRGC, biomarcadores

Abstract: This work describes the implementation of a video-oculography (VOG) and pupillometry system to measure pupillary reflexes in 20 volunteers (21 ± 3 years old) under blue and white light stimuli in a controlled environment. Although the sample size is small, the results demonstrate that the system can effectively obtain pupillary data, showing positive evaluations for both the system and the infrastructure used. Three 10 ms light stimuli were applied at 10 s intervals, recording pupil areas between 3000 and 9000 pixels, with maximum contractions ranging from 3000 to 5000 pixels. The results show that blue light induces slightly stronger contractions (average PCA: 444–449 pixels²) than white light (average PCA: 410–417 pixels²), with a decrease in the post-illumination pupillary response (PIPR) during the third cycle due to fatigue of intrinsically photosensitive retinal ganglion cells (ipRGCs). This system provides a preliminary database for future studies using artificial intelligence to identify potential biomarkers for ocular or parasympathetic system disorders.

Keywords: Pupillometry, pupillary reflex, blue light, white light, video-oculography, ipRGC, biomarkers

1 Introducción

La visión es un sentido primordial para los seres vivos, facilitando la adquisición de conocimiento y el desarrollo eficiente de procesos cognitivos esenciales para el aprendizaje autónomo. Dada su relevancia, se han desarrollado metodologías no invasivas para el estudio de la respuesta pupilar a estímulos luminosos, como la video-oculografía y la pupilometría (Blandino Ortiz & Higuera Lucas, 2022; Martínez-Ricarte et al., 2013). Los ojos son la principal vía de información sensorial hacia el cerebro, con más del 80% de los datos transmitiéndose a través de estímulos visuales que las células retinianas convierten en señales electroquímicas para su interpretación.

Aplicaciones principales de la video-oculografía y pupilometría abarcan el área de la medicina, para evaluar enfermedades del sistema nervioso y afecciones ya que pueden estar relacionadas con diversos biomarcadores (Christofi, 2022). En la pupilometría se permite observar y calcular la respuesta pupilar a la iluminación, sin ningún límite de edad, analizando los efectos ante distintas frecuencias de luz visible (Martínez-Ricarte et al., 2013).

El estudio del reflejo pupilar ha avanzado significativamente para determinar diversas afecciones; en Zarifkar et al., (2024), analizaron la respuesta reflejo pupilar apagado (PLO) en pacientes que presentan trastornos agudos de la conciencia. Por otro lado, Barry et al., (2022) desarrollaron un pupilómetro basado en un smartphone utilizando luz infrarroja, roja, verde y azul (RGB) con el fin de monitorear de forma remota la salud de personas mayores e investigación clínica.

En los estudios de pupilometría constantemente es usada la luz RGB debido a que tienen un impacto en la excitación de las células ganglionares fotosensibles (ipRGCs) que se encuentran en la retina, por ello se estudia su aplicación en distintas enfermedades. En el trabajo de Tan et al., (2022), se evalúa la pupilometría portátil utilizada para detección de glaucoma y la evaluación de alteraciones neurales en pacientes con diabetes mellitus tipo 2, ambos utilizando estímulos de luz de color rojo y azul. Además, se han empleado métodos basados en wavelets y algoritmos de Machine Learning para diagnosticar el TDAH a través de la dinámica pupilar durante tareas cognitivas (Vimalajeewa et al., 2022).

A pesar de los avances en pupilometría para la detección y análisis de patologías, la literatura actual carece de estudios específicos sobre el PLR (Pupillary Light Reflex) en la población mexicana**,** donde se utilicen sistemas de video-oculografía con espectros de luz en color azul y blanco. Los trabajos previos, si bien demuestran la utilidad de la pupilometría, no exploran las particularidades de la respuesta pupilar bajo estas condiciones lumínicas ni establecen una base de datos local para futuros estudios con Inteligencia Artificial.

En este contexto, este documento presenta la implementación y evaluación de un sistema de video-oculografía y pupilometría que emplea estímulos de luz azul y blanca para estudiar sus efectos en el PLR de estudiantes del Centro Universitario UAEMEX Valle de México. Nuestro objetivo es obtener el cálculo de la contracción pupilar y generar una base de datos específica que sirva como punto de partida para investigaciones posteriores con apoyo de la Inteligencia Artificial. Este enfoque, no solo permitirá conocer la idoneidad de la infraestructura para este tipo de experimentos en el entorno universitario, sino que también sentará las bases para futuras aplicaciones diagnósticas y de monitoreo adaptadas a nuestra población.

El artículo se estructura comenzando con un resumen del funcionamiento de la pupila y los fotorreceptores, seguido de la metodología e implementación del modelo VOG para la obtención de los reflejos pupilares, y concluyendo con los resultados y hallazgos clave de esta investigación.

2 La Pupila y los Fotorreceptores

El ojo es una semiesfera compuesta por diversos elementos externos e internos que, en conjunto, forman un sistema complejo que permite la visión. En su centro se encuentra el iris, una membrana

pigmentada que define el color característico del ojo. Justo en el centro del iris está la pupila, un orificio que, aunque a simple vista parece un pequeño círculo, reacciona según la cantidad de luz ambiental. Su diámetro oscila entre 2 y 8 mm, con un promedio de 3.5 mm. Es importante señalar que existen variaciones individuales y condiciones que pueden afectar la apariencia y función de la pupila (Conti, Battaglini & Mora, 2010).

El diámetro pupilar se ajusta gracias a dos músculos, el esfínter y el dilatador de la pupila, controlados por el sistema nervioso autónomo (vía parasimpática y simpática). La vía aferente envía información sobre la cantidad de luz al cerebro, y la vía eferente transmite las órdenes para regular el tamaño pupilar. Específicamente, la vía parasimpática provoca la miosis (contracción) en respuesta a una gran cantidad de luz, mientras que la vía simpática induce la midriasis (dilatación) en condiciones de luz baja, permitiendo el paso de más luz para mejorar la visión (Quiroz-González et al., 2021).

Dentro de la retina se localiza la mácula, responsable de la formación de imágenes y del reconocimiento de colores y formas, con una conexión directa a los nervios ópticos para el envío de información. En el centro de la mácula se encuentra la fóvea, crucial para la visión central, que contiene los fotorreceptores y las células ganglionares intrínsecamente fotosensibles (ipRGC). Los conos permiten la visión central y diurna o fotópica, siendo sensibles a las longitudes de onda roja (564–580 nm), verde (534–545 nm) y azul (420–440 nm). Por otro lado, los bastones son responsables de la visión periférica en condiciones de poca luz o visión escotópica, y no detectan colores, solo escalas de gris (Graue Wiechers, 2019).

La luz azul y blanca ha sido empleada en numerosos estudios para detectar diversas enfermedades. A continuación, se presenta un resumen de trabajos que demuestran la importancia del estudio de la pupilometría aplicada con estos colores.

2.1 Aplicaciones de la Luz Azul y Blanca en Pupilometría

En el ámbito de las enfermedades degenerativas, Kuze et al. (2021), realizaron un estudio que examinó la respuesta pupilar posterior a la iluminación (PIPR) provocada por estímulos de luz azul y blanca. Su investigación se centró en afecciones oculares relacionadas con las cataratas y en el uso de lentes intraoculares selectivos (IOL) diseñadas para filtrar la luz azul. Este trabajo demostró las implicaciones de la luz azul y blanca en las IOL, además de abordar la reducción de la sensibilidad a la luz azul atribuida al envejecimiento y a la formación de cataratas.

Para el caso de las enfermedades neurodegenerativas, Chougule et al. (2019), analizaron cómo las respuestas PIPR se alteran en pacientes con enfermedad de Alzheimer en comparación con individuos sanos. En este estudio se observó como los pacientes tienen una respuesta pupilar PIPR diferente ante los estímulos de luz blanca en comparación con luz azul. Estos hallazgos proporcionan información sobre biomarcadores en la progresión de la enfermedad y el deterioro del sistema nervioso autónomo

En cuanto a la depresión, se ha evaluado la PIPR como biomarcador de la sensibilidad al color azul en pacientes con Episodio Depresivo Mayor. En este estudio se resalta la importancia de la luz blanca en pacientes con esta condición y en la sensibilidad que sufren sus células ipRGCs que ralentiza su PIPR. En esta investigación se recomienda fototerapia de luz azul, además de medicación auxiliar, en apoyo para el tratamiento de este trastorno.

De acuerdo con los estudios mencionados, se encontró que:

- **PIPR para luz azul:** En color azul tiene el efecto de producir respuestas de recuperación pupilares más pronunciadas que en otros colores RGB debido a que estas son más sensibles a este tipo de luz (Kuze et al. (2021)

- **PIPR para luz blanca:** La intensidad que se produce en PIPR por la luz blanca no es tan intensa como la de la luz azul, dado que esta abarca un espectro de varias longitudes de onda de luz visible (que oscila entre 400 nm y 700 nm) que son necesarias para su percepción en el ojo (Maruani et al., 2025).
- **PIPR** en sus distintas recciones al interactuar con diferentes longitudes de luz visible pueden medirse y, obtener información que permite encontrar biomarcadores para evaluar la salud en general además de la función neurológica a través de las células ipRGC. Por lo que esta información se ha ocupado en el desarrollo de tratamientos y dispositivos médicos (Chougule et al., 2019).

En México existe un problema de salud pública respecto a problemas visuales que tienen influencia relacionadas con catarata senil, glaucoma, diabetes entre otras (Secretaría de Salud, 2020). Además, según reportes del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), después de la pandemia de COVID-19 ha aumentado los casos de depresión en la población mayor de 60 años (Instituto Nacional de Estadística y Geografía,2023). Por ello es importante mediante el estudio de la pupila, implementar técnicas que puedan prevenir enfermedades, y evitar complicaciones severas.

2.2 Propuesta de Investigación

Al analizar las investigaciones previas, es importante destacar que, para el estudio de la aplicación de los estímulos con los colores azul y blanco en la pupila, se ha tomado en cuenta la relevancia de estas longitudes de onda de luz visible, para llevar a cabo una investigación inicial que permita conocer sus efectos en un ambiente controlado y sus futuras aplicaciones en la búsqueda de biomarcadores para diversas patologías con la ayuda de la Inteligencia Artificial.

En este trabajo, se obtuvo una base de datos que permitió el estudio del PLR en los colores azul y blanco. Para lograrlo, se midió la velocidad de reacción partiendo del Diámetro Pupilar Basal (BPD), que es el tamaño de la pupila antes de la estimulación. Posteriormente, se calculó la contracción hasta su punto más bajo (PCA: Pupil Constriction Amplitude) y, finalmente, el PIPR ya mencionado anteriormente.

3 Metodología e Infraestructura

La metodología, infraestructura y el cálculo del área pupilar para este estudio se basaron en la investigación de Belen-Luna et al. (2024), quienes implementaron un sistema para obtener reflejos pupilares con colores RGB.

Para este caso en específico, el enfoque inicial fue la construcción de un sistema de video-oculografía (VOG) para documentar los reflejos pupilares. Posteriormente, los datos de estas grabaciones se analizaron para eliminar posibles fotogramas viciados, como parpadeos continuos, cambios bruscos de iluminación o acomodamiento natural del ojo. A continuación, se implementó un algoritmo de visión artificial en Python con OpenCV para detectar y calcular el área pupilar, guardando estos datos en un archivo CSV de Excel. Esta información es esencial para generar las series de tiempo pupilar y calcular el tiempo de contracción para cada estímulo.

3.1 Configuración Experimental

Para la implementación del sistema VOG se utiliza una jaula de Faraday que está cubierta para evitar iluminación externa. En el centro del techo de la jaula, se instaló una tira LED de luz blanca de 6000K regulable (110V), calibrada a 1.61 cd/m². Esta iluminación de fondo crea un ambiente que permite al ojo del sujeto de prueba adaptarse gradualmente a la penumbra, minimizando la incomodidad a los estímulos de luz durante la experimentación.

El registro del PLR se realizó con una cámara réflex Canon EOS T6 Rebel, utilizada para capturar video en alta definición (HD) a 60 FPS (Fotogramas por Segundo). La cámara fue equipada con un lente macro Canon de 50mm y tres adaptadores macro adicionales (16, 21 y 32 mm), permitiendo tomas de gran acercamiento. El sistema fotográfico es colocado sobre un sistema deslizable que ayuda al ajuste en el enfoque. Tomando como base el lente macro se colocó un anillo de luz infrarroja (IR) para iluminar la grabación en la penumbra de la jaula, pero sin afectar el PLR ya que este no se encuentra en un rango visible para el ojo.

Frente a la cámara, se colocó un soporte de mentón oftalmológico ajustable en altura, diseñado para posicionar al sujeto de prueba de manera cómoda y estable. Durante la grabación, el sujeto se sentó frente a este soporte, enfocando la captura en el ojo izquierdo. La configuración experimental descrita se ilustra en la **Figura 1**.

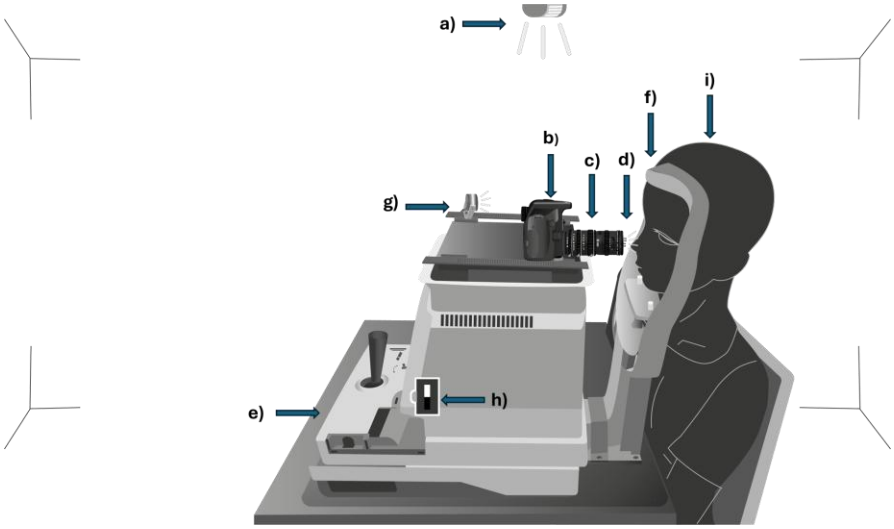

Figura 1. Representación gráfica de la disposición espacial de los elementos necesarios para la obtención de los estímulos pupilares: a) iluminación de fondo, b) cámara, c) lente macro, d) anillo de luz IR, e) base deslizable, f) base oftalmológica, g) estímulo, h) control de estímulos i) sujeto de estudio (S).

Protocolo de Estimulación y Adquisición de Datos.

La estimulación pupilar se realizó mediante un LED RGBW de 1W, calibrado a 20 cd/m² para cada color (azul y blanco) y se posicionó a 29.8 cm del ojo derecho del sujeto de prueba. Para su calibración se usó un fotómetro COHERENT modelo IL400.

El protocolo de experimentación consistió en:

- Envío de tres estímulos lumínicos por cada color (azul y blanco).
- Cada estímulo tuvo una duración de 10 milisegundos.
- Se estableció un intervalo de 10 segundos entre cada disparo de luz. Durante este intermedio, no se realizó grabación (el anillo IR permaneció apagado) para facilitar la recuperación pupilar tras el estímulo.
- La captura de datos se llevó a cabo primero con el color azul, seguida de un período de 2 minutos de recuperación para el sujeto, antes de proceder con el registro para el color blanco. Este ciclo se repitió para cada participante.

3.2 Metodología y Procesamiento de Datos

El procesamiento de las grabaciones de video se realizó en dos etapas principales:

Primera Etapa: Preprocesamiento.

Inicialmente, se lleva a cabo la obtención de los fotogramas del video, descartando las tomas correspondientes a los intermedios de grabación. También se eliminaron los fotogramas que presentan parpadeos muy marcados o cambios significativos en la posición de la pupila, los cuales pueden deberse al proceso natural de acomodación ocular o al cansancio del sujeto de prueba, estos inconvenientes son llamados artefactos y la evaluación de estos permite utilizar solo los fotogramas donde se vea la pupila correctamente, para evitar errores en la medición de las series de tiempo.

Posteriormente, se inicia el análisis individual de cada fotograma mediante un algoritmo de visión artificial para obtener el área pupilar basado en estas dos etapas y se muestra gráficamente en la **Figura 2**:

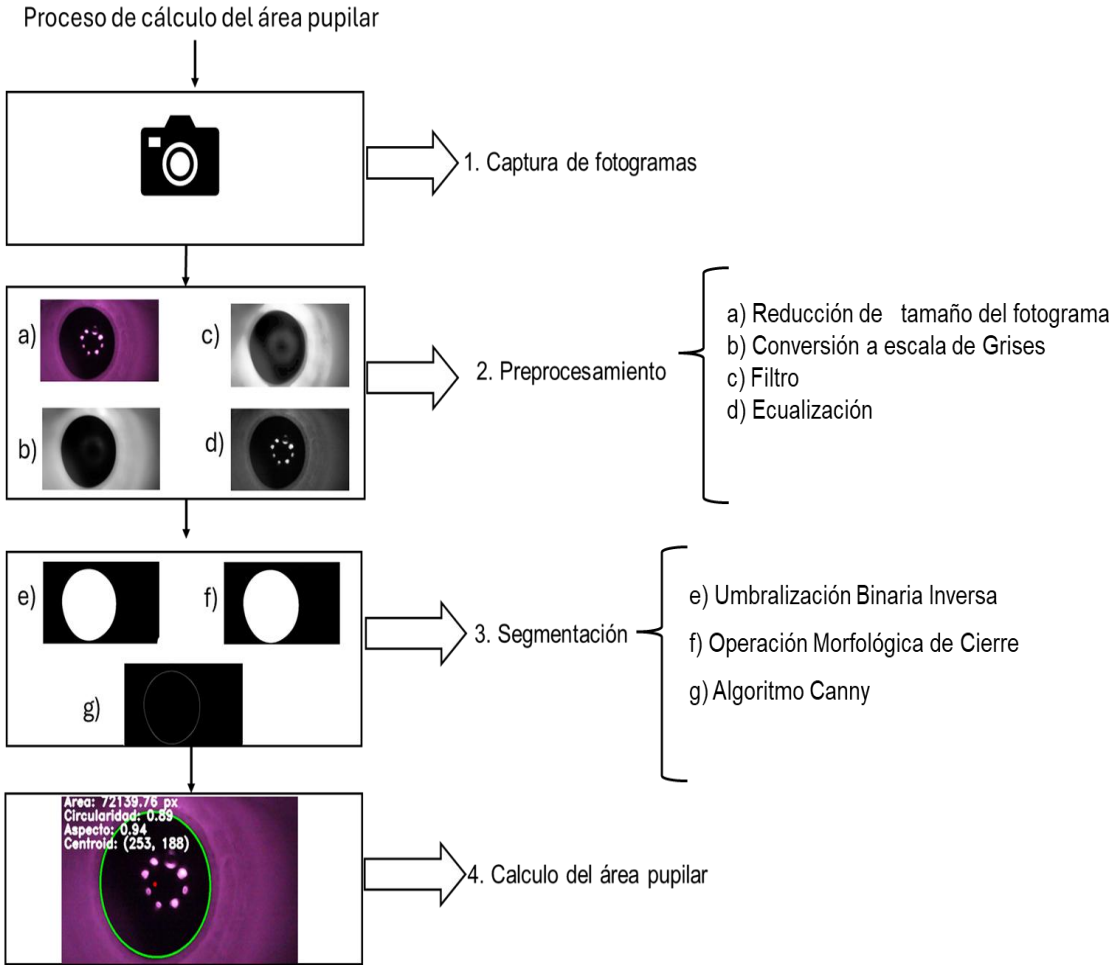

Figura 2. Algoritmo para procesamiento de imágenes y detección del área pupilar donde corresponden a los siguientes pasos 1. Captura de fotogramas, 2. Preprocesamiento, 3. Segmentación, 4. Cálculo de área.

- **Redimensionamiento:** Se ajusta el tamaño de la imagen de 1280 x 720 a la mitad que seria 640 x 360 pixeles para optimizar el procesamiento. No afecta ya que la escala de la

imagen es equivalente a la calibración de la toma. Para los cálculos posteriores esta conversión se toma en cuenta para evitar problemas de medición en el área y velocidad.

- **Conversión a escala de grises:** Cada imagen se convierte a escala de grises. Esto elimina la información de color y, crucialmente, minimiza el reflejo de la luz infrarroja (IR), permitiendo centrarse únicamente en la intensidad de los píxeles para la detección pupilar.
- **Filtrado:** La imagen en escala de grises se filtra para suavizarla y reducir el ruido, preservando al mismo tiempo los bordes relevantes de la pupila.
- **Ecualización de fotograma:** Finalmente, se ecualiza la imagen filtrada para realzar las regiones más oscuras, lo que facilita la posterior segmentación de la pupila.

Segunda Etapa: Segmentación. En la segunda etapa, se procede con la **segmentación** de la pupila:

- **Umbralización Binaria Inversa:** Se aplica una umbralización binaria inversa para que la sección interna al borde que representa la pupila aparezca en color blanco y la parte externa se convierta en un color negro.
- **Operación Morfológica de Cierre:** Sobre la imagen umbralizada, se realiza una operación morfológica de cierre para rellenar posibles huecos y suavizar el contorno que representa el perímetro de la pupila.
- **Algoritmo Canny:** Para delimitar con precisión los contornos externos de la pupila, se emplea el algoritmo de detección de bordes Canny.
- **Cálculo del Área Pupilar:** Una vez que los contornos están definidos, se procede al cálculo del área pupilar. Este cálculo se realiza utilizando la Ecuación 1, y el resultado del área se expresa en píxeles cuadrados.

$$A = \pi \left(\frac{eje\ mayor}{2}\right)\left(\frac{eje\ menor}{2}\right) \tag{1}$$

El procesamiento de los datos se realizó en el lenguaje de programación **Python**, empleando las librerías **OpenCV** para la identificación de la pupila por medio de visión artificial y **SciPy** para los cálculos científicos.

Criterios de Análisis para implementación de sistema VOG:

- **Detección pupilar**: El algoritmo identifica la pupila en cada fotograma obtenido del video. Se aplican técnicas de umbralización y detección de contornos para aislar la región pupilar.
- **Cálculo del área pupilar**: Una vez detectada la pupila, se calcula su área en píxeles.
- **Series de tiempo pupilar**: Los datos del área pupilar a lo largo de los distintos fotogramas o frames, estos se organizan en series de tiempo para cada estímulo, lo que permite observar la dinámica de contracción y dilatación este fenómeno se puede observar en la Figura 3 y Figura 4.
- **Cálculo de la velocidad de contracción**: Se determinará la velocidad de respuesta pupilar desde el último punto del diámetro basal hasta el punto de máxima contracción.
- **Cálculo de la velocidad de recuperación:** Se calcula el tiempo de PIPR desde el punto de máxima contracción hasta el punto de recuperación basal.

Para la experimentación, se consideró una muestra de 20 voluntarios, compuesta por 10 mujeres y 10 hombres, con edades de 21 ± 3 años. Aderman et al. (2024) y Fan et al. (2009) identificaron diferencias en la respuesta pupilar entre hombres y mujeres, aunque con efectos pequeños y

dependientes del contexto. Dado que esta investigación no tiene fines diagnósticos ni de análisis por género, dichas diferencias no serán consideradas.

Se utilizó un muestreo no probabilístico, ya que la selección se basó en la accesibilidad de un grupo específico para la investigación. Aunque la muestra es limitada, se espera que los datos preliminares obtenidos sean significativos y proporcionen información valiosa para el futuro de la investigación.

Con el fin de mantener la confidencialidad de los participantes, se les asignó una etiqueta alfanumérica. Por ejemplo, los sujetos se identificaron como 'SB', donde 'S' corresponde a 'sujeto' y 'B' al color blanco. Luego se añadió el número del sujeto (por ejemplo, SB1, SB2, ..., SB20).

Todos los participantes firmaron un formulario de consentimiento informado donde se les detalló el tipo de experimentación a realizar y los datos que se recopilarían a través de un cuestionario. Este proceso se adhiere a la Declaración de Helsinki, y el protocolo de estudio fue presentado y aprobado por el Comité de Ética en Investigación de la Universidad Autónoma del Estado de México, bajo el registro número 007.2023.

Criterios de Inclusión y Exclusión. Entre los principales criterios establecidos en el protocolo para la participación en la experimentación se encuentran:

- No haber consumido analgésicos o antidepresivos previamente a la prueba.
- No haber experimentado ataques epilépticos.
- No haber consumido sustancias alcohólicas o recreativas antes de la prueba.
- Haber ingerido el primer alimento del día.

Características de la Muestra Preliminar. Entre los sujetos de estudio, se observaron las siguientes condiciones reportadas:

- **45%** de los sujetos reportaron visión borrosa.
- **70%** manifestó presentar fatiga ocular.
- **80%** refirió haber tenido falta de sueño.

4 Resultados

Series de Tiempo de la Respuesta Pupilar

La **Figura 3**, muestra las series de tiempo de la respuesta pupilar de los 20 sujetos al estímulo de **color blanco**. En el eje horizontal, denominado FPS, el rango aproximado es de 0 a 350, mientras que el eje vertical, etiquetado como "Área pupilar (píxeles^2)", registra valores entre 3000 y 9000 píxeles

Cada sujeto de estudio está representado por una serie de tiempo con un color diferente (rojo, verde, azul, naranja, entre otros 16 colores), que ilustra el comportamiento de la pupila frente a los tres estímulos, etiquetados como "contracción 1", "contracción 2" y "contracción 3". Al inicio de cada contracción, se observa un período sin cambios significativos en la pupila, conocido como **tiempo BPD (Diámetro Pupilar Basal)**.

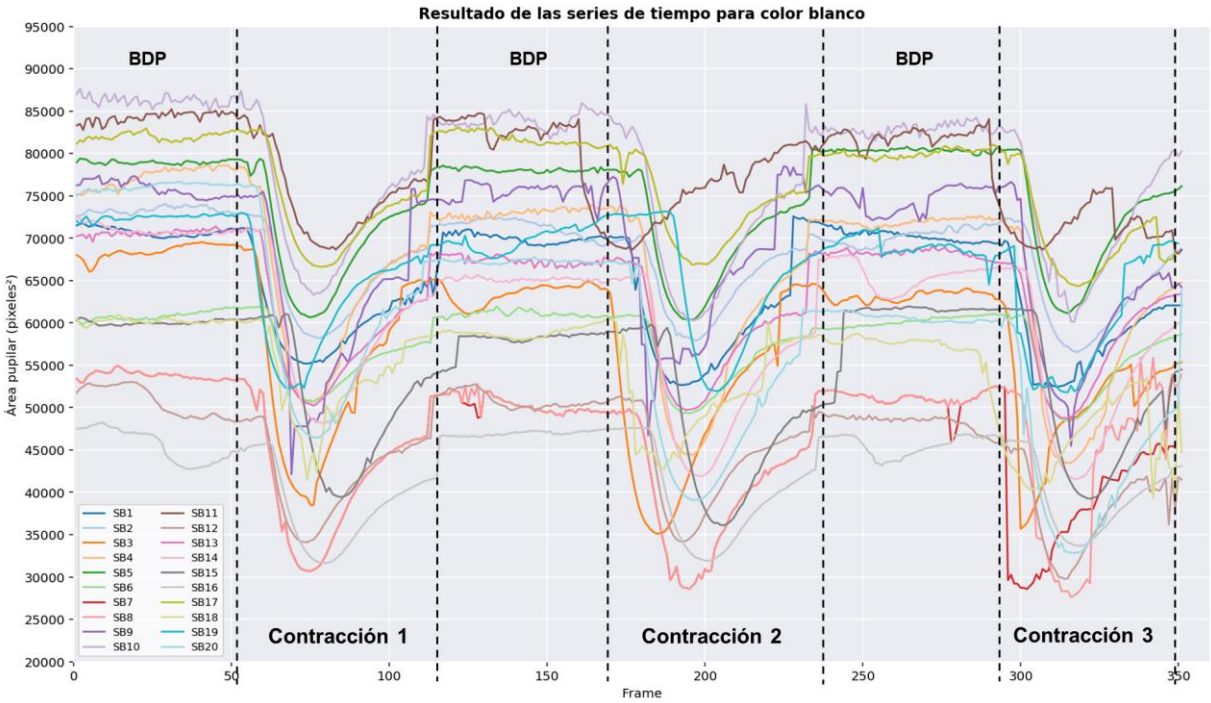

Figura 3. Se muestran los resultados para las series de tiempo de la respuesta pupilar de 20 sujetos al estímulo de color blanco.

Cada estímulo provoca una contracción rápida de la pupila, seguida de una recuperación más lenta hasta alcanzar gradualmente un estado estable. Los valores previos al descenso reflejan el BPD, y los mínimos indican el punto de máxima contracción (PCA). Las variaciones entre las diferentes series son notables; por ejemplo, se observan contracciones muy profundas en sujetos como SB3 y menos profundas en SB8, lo que subraya las diferencias individuales entre cada participante.

La **Figura 4**, presenta los resultados de las series de tiempo para el estímulo de **color azul**. En este caso, los sujetos se identifican como 'SA' (Sujeto Azul, por ejemplo, SA1, SA2, ..., SA20). Se mantuvo la correspondencia de color de las series de tiempo con las utilizadas para el estímulo blanco. De manera similar, se observa el tiempo BPD antes de cada una de las tres contracciones. En estas series, SA11 muestra una contracción menos profunda, mientras que SA19 exhibe una disparidad muy marcada con respecto a las demás muestras, lo cual se atribuye principalmente a parpadeos o fatiga durante la captura del video.

Es importante destacar que los resultados no siempre se presentan de forma homogénea debido a la dificultad inherente de mantener el ojo en una posición constante durante la grabación. Fenómenos como el parpadeo, el esfuerzo muscular para mantener el ojo abierto, la acomodación natural de la pupila y los cambios de iluminación pueden influir. Además, existen variaciones individuales y condiciones que afectan la apariencia y función pupilar. Cuando estos fenómenos son muy marcados, se descartan en el análisis de los fotogramas; sin embargo, pequeñas contracciones debidas al estrés son comunes y se mantienen. Otros factores influyentes incluyen la edad y, como se reveló en el cuestionario de conformidad, la notoria ausencia de sueño en muchos participantes (debido a sus actividades como estudiantes) y que el 45% de los sujetos reportaron problemas para enfocar objetos.

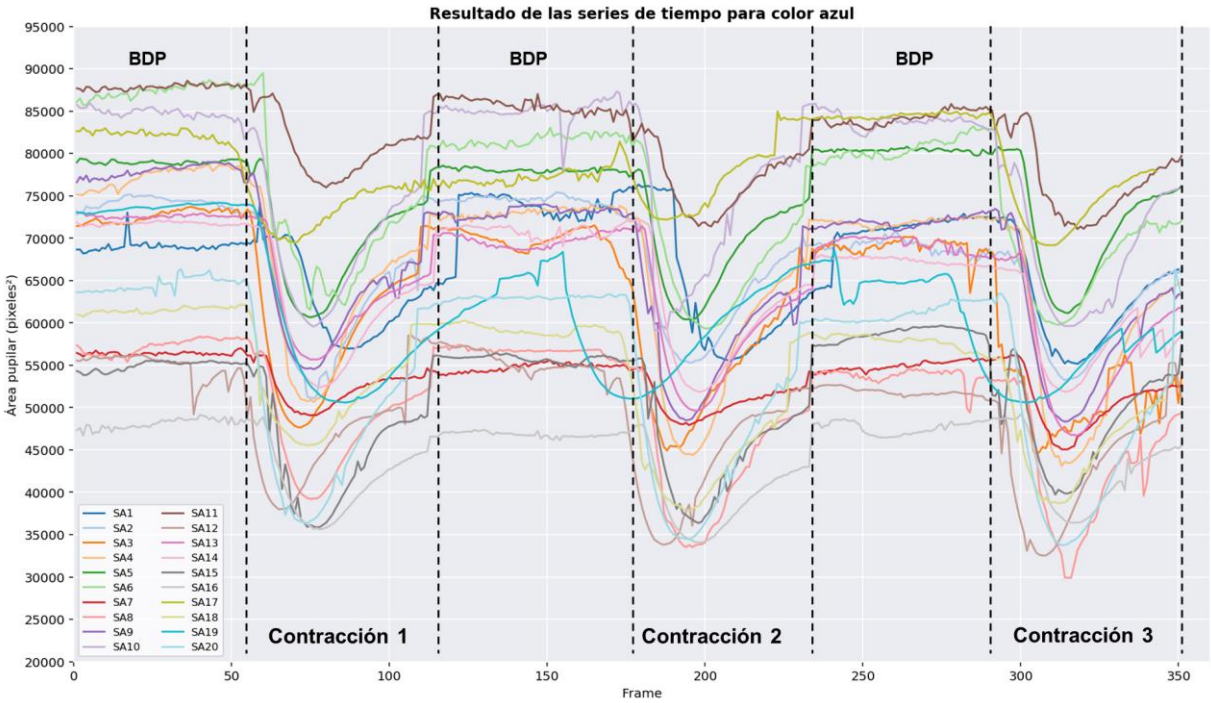

Figura 4. Se muestran los resultados para las series de tiempo de la respuesta pupilar de 20 sujetos al estímulo de color azul

Aunque se pueden realizar análisis complejos sobre el comportamiento diverso de la pupila en cada sujeto, este artículo se enfoca en presentar la medición de la velocidad de contracción y la velocidad de recuperación para cada una de las tres contracciones registradas por sujeto.

4.1 Cálculo de la Velocidad de Contracción y Recuperación

Para determinar las velocidades de contracción y recuperación, se aplicó el filtro de Savitzky-Golay a cada una de las señales pupilares (Schafer, 2011). Este filtro suaviza los datos utilizando un método de mínimos cuadrados, lo que permite eliminar el ruido (artefactos) mientras preserva características importantes como picos y valles, evitando así errores en el cálculo de la velocidad sin alterar la forma general de la respuesta pupilar (Espinosa, Roig, Pérez, & Mas, 2015; Fan & Yao, 2010; Ren, Barreto, Gao, & Adjouadi, 2012).

Para obtener los valores de las velocidades de contracción y recuperación muchos de los trabajos existentes al utilizar aparatos oftalmológicos especializados solo presentan los resultados obtenidos y no la forma de como obtuvieron los cálculos (Pinheiro & da Costa, 2021). Sin embargo, para obtener los valores nos basamos en el trabajo de Bremner (2012), adecuando la forma de obtener los resultados referentes a la velocidad de PCA y PIPR.

Velocidad de Contracción: Para calcular la velocidad de contracción, el algoritmo detecta los picos mínimos (que corresponden a las contracciones máximas) y los picos máximos (que preceden a la contracción). Se seleccionan los tres mínimos más pronunciados y, para cada uno, se identifica el máximo anterior como el inicio del proceso de contracción. La **Figura 5**, presenta las gráficas resultantes de la aplicación del filtro de Savitzky-Galay y el algoritmo descrito, mostrando la Amplitud de Contracción Pupilar (PCA) para los estímulos blanco y azul en el Sujeto 8 (SB8, SA8) y el Sujeto 20 (SB20, SA20). En estas gráficas, se observan claramente los puntos de inicio (marcados en azul) y los puntos de máxima contracción (marcados en rojo) para ambos sujetos.

Aunque el BPD no siempre es lineal, las mínimas contracciones no impiden diferenciar el inicio de cada PCA. Cada PCA está delimitada por líneas punteadas que marcan el inicio de la contracción y líneas continuas que indican la contracción más profunda, utilizando color rojo (PCA1), verde (PCA2) y violeta (PCA3).

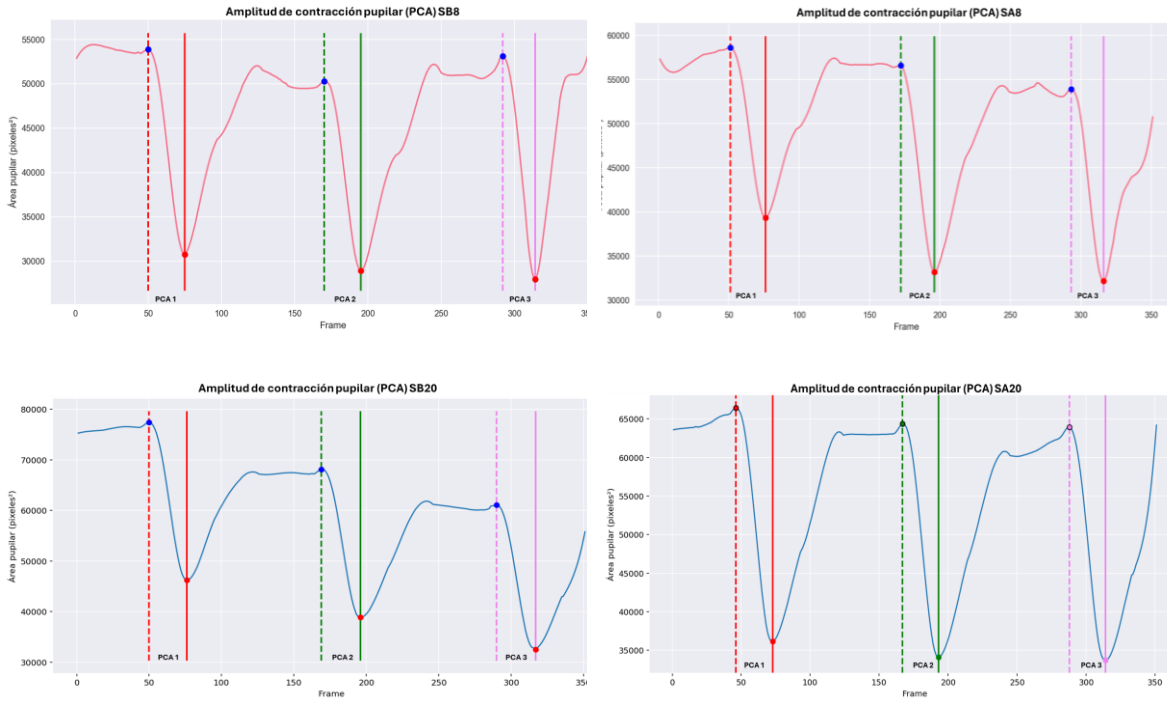

Figura 5. Amplitud de contracción pupilar (PCA) para los estímulos blanco y azul del sujeto 8 (SB8 y SA8) y el sujeto 20 (SB20 y SA20).

A partir de los pares máximo-mínimo se calcula la velocidad de contracción utilizando la siguiente fórmula. Para el cálculo del tiempo de contracción se emplea la Ecuación 2.

$$t = \left(\frac{\Delta frames}{fps}\right) \times 1000 \tag{2}$$

Donde:

$\Delta frames = frame\ maximo - frame\ mínimo$, fps es el número de cuadros por segundo en el video y t es el tiempo expresado en milisegundos.

Por otro lado, para el cálculo de la velocidad se emplea la Ecuación 3.

$$V = \left|\frac{area\ minima - area\ maxima}{t}\right| \tag{3}$$

Donde:

$area\ minima$, el valor del área pupilar en el mínimo (cuando la pupila estaba más contraída), $area\ maxima$, el valor del área pupilar en el máximo (cuando la pupila está en su estado basal), V es la velocidad de cambio del área pupilar ($pixeles^2/ms$)

El resultado de la velocidad tendrá un resultado negativo esto indica que se presenta una contracción, pero para fines prácticos de análisis se toma el valor absoluto. En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos para PCA y PIPR mostrando un análisis mas detallado.

Velocidad de Recuperación (PIPR): Para encontrar el tiempo de recuperación o PIPR, el algoritmo localiza los picos mínimos (contracciones máximas). De estos, se seleccionan los tres mínimos más prominentes y, a partir de cada uno, se busca el pico máximo posterior, que representa el punto donde la pupila se ha recuperado. La **Figura 6**, muestra las gráficas resultantes de la aplicación del filtro de Savitzky-Galay y el algoritmo, ilustrando la Respuesta Pupilar Post-Iluminación para los estímulos blanco y azul en el Sujeto 8 (SB8, SA8) y el Sujeto 20 (SB20, SA20). Cada PIPR está delimitado por líneas: las líneas continuas (rojo PIPR1, verde PIPR2 y violeta PIPR3) marcan la contracción más profunda, y las líneas punteadas indican la recuperación pupilar hasta alcanzar un Diámetro Pupilar Basal.

En estas gráficas, se observa que el tiempo de recuperación es generalmente más prolongado que el tiempo de contracción. Además, en algunos sujetos, la recuperación pupilar no es completa, lo que podría deberse a fatiga o a la adaptación a los estímulos repetidos. Casos como el de SB8 y SA8, donde se nota una recuperación no constante con pequeñas contracciones intermedias, se manejan en el cálculo de la velocidad considerando solo el punto de recuperación hacia el estado basal.

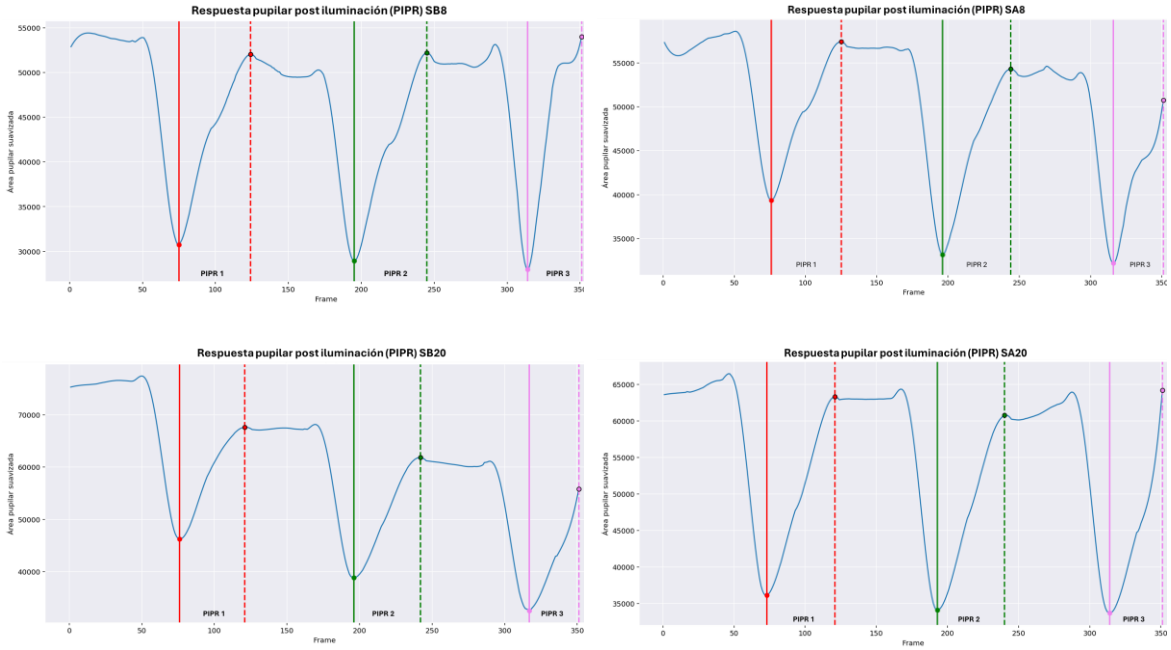

Figura 6. Respuesta pupilar post iluminación (PIPR) para los estímulos blanco y azul del sujeto 8 (SB8, SA8) y el sujeto 20 (SB20 y SA20).

Para cada par mínimo-máximo se calcula PIPR utilizando primero la Ecuación 1 y para el cálculo de la velocidad se emplea la Ecuación 4.

$$V = \frac{area\ final - area\ minima}{t} \qquad (4)$$

Donde: $area\ final$: el valor del área pupilar máxima (cuando la pupila ya se recuperó), $area\ mínima$: el valor del área pupilar mínima (cuando la pupila estaba más contraída), V: Velocidad de cambio del área pupilar ($pixeles^2/ms$).

De acuerdo con los resultados obtenidos se presenta a continuación un análisis descriptivo para analizar el comportamiento de PCA y PIPR para cada estimulo en tres ciclos que duro la experimentación para cada estimulo.

4.2 Análisis Descriptivo para los Estímulos Azul y Blanco

El análisis descriptivo es fundamental para examinar los datos antes de realizar estudios más complejos. Proporciona una visión clara sobre la efectividad de los estímulos utilizados y es crucial para determinar la viabilidad de futuras investigaciones. La **Tabla 1,** presenta los resultados del análisis descriptivo por ciclo, incluyendo la media, mediana y desviación estándar (DE) para cada métrica: Amplitud de Contracción Pupilar (PCA), Respuesta Pupilar Post Iluminación (PIPR) y el Total (suma de PCA y PIPR) para cada uno de los tres ciclos (C1, C2, C3) de estimulación de los colores azul y blanco, aplicado a los 20 sujetos de prueba.

Tabla 1. Análisis descriptivos de los estímulos pupilares azul y blanco por ciclo (C1, C2. C3)

Métrica	Azul C1	Azul C2	Azul C3	Blanco C1	Blanco C2	Blanco C3
PCA - Media	444.17	449.00	445.85	416.67	410.00	420.83
PCA - Mediana	433.33	425.00	433.33	416.67	400.00	400.00
PCA - DE	52.50	87.04	64.64	54.88	25.59	75.68
PIPR - Media	806.10	797.33	576.67	797.33	784.50	545.83
PIPR - Mediana	800.00	783.33	583.33	800.00	791.67	550.00
PIPR - DE	58.72	58.95	105.32	72.12	53.62	100.27
TOTAL - Media	1250.27	1246.33	1018.37	1214.00	1194.50	966.67
TOTAL - Mediana	1233.33	1233.33	1000.00	1216.67	1200.00	950.00
TOTAL - DE	97.08	91.98	122.83	84.24	56.58	90.32

Para una mejor visualización de los datos se presenta un gráfico de barras con las medias de PCA y PIPR en la **Figura 7**, para los tres ciclos de medición (Ciclo 1, Ciclo 2, Ciclo 3) en los estímulos de luz blanca y azul. Donde el Eje x representa los tres ciclos de medición. El eje Y: Muestra las unidades de amplitud (para PCA) o tiempo (para PIPR), dependiendo de la medición. Las barras azules corresponden a las medias de PCA. Las barras rojas corresponden a las medias de PIPR. Las barras de error representan las desviaciones estándar (variabilidad) para cada medición en cada ciclo. Esto indica qué tan dispersos están los valores en relación con la media.

En la **Figura 7,** se observa que la altura de las barras del PCA (azules y celestes) se mantiene relativamente estable a lo largo de los tres ciclos, y son muy similares entre sí para ambos estímulos. Esto sugiere que PCA de la pupila es consistente y no varía significativamente con el tipo de luz (azul vs. blanca) ni con las mediciones repetidas.

Para PIPR, los tiempos de recuperación disminuyen notablemente entre el Ciclo 1 y el Ciclo 3, con una mayor dispersión en los resultados en el último ciclo. El tiempo de recuperación de la pupila (PIPR) disminuye drásticamente del Ciclo 1 al Ciclo 3, tanto para la luz azul como para la blanca.

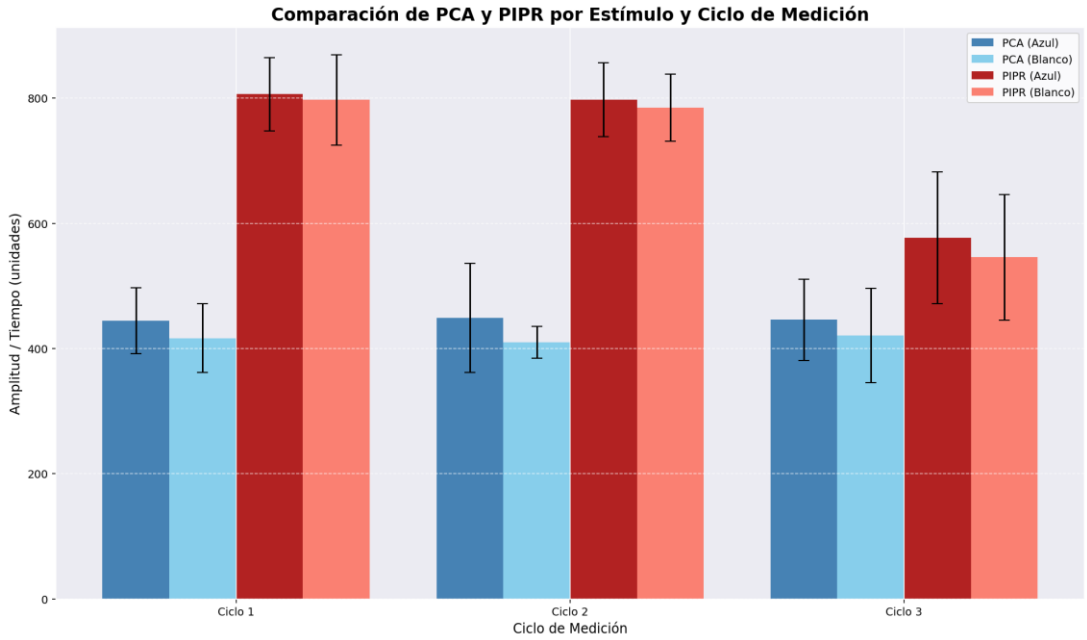

Figura 7. Comparación de PCA Y PIPR para cada ciclo de estimulación de los colores azul y blanco

Aunque la tendencia es la misma para ambos colores, el gráfico muestra que el PIPR al estímulo azul es consistentemente más alto que el PIPR al estímulo blanco en los tres ciclos. Esto sugiere que la luz azul, a pesar de tener una intensidad similar, provoca un tiempo de recuperación de la pupila ligeramente más prolongado. Esta es una diferencia clave entre los dos estímulos.

A continuación, se presenta el análisis más detallado basado en la Tabla 1 y la Figura 7.

Amplitud de Contracción Pupilar (PCA)

- **Promedios:** Los promedios de PCA para el estímulo azul (444.17, 449.00, 445.85) son consistentemente ligeramente más altos que los del estímulo blanco (416.67, 410.00, 420.83) en todos los ciclos. Esto sugiere que la luz azul, en promedio, provoca una contracción pupilar máxima de mayor magnitud. Los promedios se mantienen relativamente estables a lo largo de los ciclos para ambos estímulos.
- **Media vs. Mediana:** La cercanía entre la media y la mediana en todas las condiciones de PCA indica que la distribución de las respuestas de contracción máxima es generalmente **simétrica** y no está fuertemente sesgada por valores extremos.
- **Desviación Estándar (DE):** La DE más baja se observa en PCA para el estímulo blanco en el Ciclo 2 (25.59). Este valor notablemente bajo, sugiere que la respuesta de contracción pupilar máxima para el estímulo blanco fue consistente entre los participantes en esa exposición. Las DEs para PCA en otras condiciones son moderadas, con un ligero aumento en la variabilidad en el Ciclo 2 para el estímulo azul (87.04) y en el Ciclo 3 para el estímulo blanco (75.68). Esto indica que, aunque la media pueda no cambiar, la consistencia individual de la respuesta puede variar, como se ilustra en las Figuras 3 y 4.

Respuesta Pupilar Post-Iluminación (PIPR)

- **Promedios:** La característica más prominente es la **disminución constante de los promedios de PIPR** a lo largo de los ciclos para ambos estímulos. Por ejemplo, para el estímulo azul, el promedio cae de 806.10 (Ciclo 1) a 576.67 (Ciclo 3). Se observa una

tendencia similar para el estímulo blanco (de 797.33 a 545.83). Esta tendencia es una fuerte evidencia de **adaptación de la respuesta pupilar** a lo largo de las exposiciones. Los promedios entre estímulos (azul vs. blanco) son bastante similares en cada ciclo.

- **Media vs. Mediana:** La proximidad entre la media y la mediana confirma que las distribuciones son generalmente simétricas.
- **Desviación Estándar (DE):** Se registra un **aumento drástico en la DE** para ambos estímulos en el Ciclo 3 (105.32 para azul, 100.27 para blanco). Esto es crucial: a medida que el sistema pupilar se adapta a la penumbra y a los estímulos, la respuesta disminuye, y la magnitud de esta adaptación puede variar considerablemente entre los individuos. Las DEs en los Ciclos 1 y 2 son considerablemente bajas, lo que indica una mayor consistencia en las fases iniciales de la respuesta sostenida.

Respuesta Pupilar Total (TOTAL)

- **Promedios:** Similar al PCA, los promedios de TOTAL para el **estímulo azul** (1250.27, 1246.33, 1018.37) son generalmente **más altos** que los del **estímulo blanco** (1214.00, 1194.50, 966.67), sugiriendo una respuesta total ligeramente mayor para la luz azul. Al igual que en el PIPR, los promedios de TOTAL disminuyen notablemente a lo largo de los ciclos para ambos estímulos, corroborando la adaptación.
- **Media vs. Mediana:** La cercanía entre media y mediana sugiere distribuciones simétricas.
- **Desviación Estándar (DE):** Se observa nuevamente una **DE muy alta en el Ciclo 3** para el estímulo azul (122.83) y una DE alta para el estímulo blanco (90.32). Esto corrobora que los participantes pueden experimentar fatiga, lo que se implica una variabilidad individual en las etapas finales de la captura de los PLR. Estos datos son consistentes con el cuestionario aplicado donde una gran cantidad de los encuestados presentan fatiga ocular.

5 Conclusiones y Trabajo Futuro

Este estudio representa un esfuerzo significativo para construir la infraestructura necesaria sin depender de mecanismos costosos de oftalmología y poner a disposición datos sobre las áreas pupilares de este tipo de estímulos luminosos, para invitar al desarrollo de investigación sobre este tema importante.

Este trabajo resalta la importancia del uso de estímulos con diferentes longitudes de onda, como la luz azul y blanca. Estos estímulos pueden ser clave para identificar patrones en la respuesta pupilar que, a su vez, podrían servir como indicadores de la salud ocular.

En este trabajo, se presentaron los resultados preliminares de la variación de las áreas pupilares ante estímulos de luz azul y luz blanca. Las series de tiempo obtenidas permitieron distinguir en la parte final de cada serie ocular los indicios de cansancio en los resultados del cálculo de PIPR.

El análisis de los diferentes patrones PLR abre la puerta a futuras investigaciones que utilicen inteligencia artificial para encontrar biomarcadores para condiciones como la depresión o la fatiga visual en la comunidad estudiantil de la UAEMEX Valle de México, es por ello por lo que adquiere una relevancia significativa este tema de investigación.

El protocolo implementado aún puede tener sesgos para obtener y procesar la información, por lo que es importante realizar un análisis detallado para una implementación futura con técnicas de procesamiento avanzadas de Inteligencia Artificial.

Se reconocieron diferentes artefactos que pueden influir en el análisis pupilar, por lo que es importante seguirlos estudiando para obtener resultados con mejor exactitud.

La finalidad de tomar un grupo reducido de sujetos de prueba, corriendo el riesgo de poder realizar solo un análisis descriptivo, es para, en primera instancia, conocer si la infraestructura implementada era capaz de obtener información sobre los PLR, y así fue satisfactoriamente, ya que las series pupilares obtenidas son semejantes a las encontradas en el trabajo de Belen-Luna et al. (2024).

En trabajos futuros Incluir el factor PCA y PIPR para conocer los efectos que tiene los estímulos RGB en hombres y mujeres por separado y realizar un análisis que permita conocer sus connotaciones y efectos. Además, incluir una muestra mucho más grande para este estudio.

Para obtener resultados más precisos y confiables en futuros trabajos, se plantea implementar un tiempo de descanso entre cada prueba de los diferentes estímulos lumínicos, además de ejecutar la prueba asegurándose de que los sujetos tuvieron un periodo de sueño reparador, y que los estudios se realicen por la mañana.

Al observar las diferencias que existen en las series oculares obtenidas, es importante un rango de edad característico, con una muestra más diversa y representativa para encontrar patrones en la aplicación de estudios posteriores.

Bibliografía

Aderman, M. J., Meister, M. R., Roach, M. H., Dengler, B. A., Ross, J. D., Malvasi, S. R., & Cameron, K. L. (2024). Normative values for pupillary light reflex metrics among healthy service academy cadets. Military Medicine, 189(7–8), 1593–1602. https://doi.org/10.1093/milmed/usad271

Belen-Luna, J. C., González-Morán, C. O., Lima-Goméz, V., & Suaste-Gómez, E. (2024). Pupillary Reflex Variability and its Correlation with RGB Color Sensitivity. Latin American Conference on Biomedical Engineering. https://doi.org/10.1007/978-3-031-89514-2_24.

Blandino Ortiz, A., & Higuera Lucas, J. (2022). Utilidad de la pupilometría cuantitativa en la unidad de cuidados intensivos [10.1016/j.medin.2021.12.003]. *Medicina Intensiva*, *46*(5), 273–276. https://doi.org/10.1016/j.medin.2021.12.003

Bremner, F. D. (2012). Pupillometric evaluation of the dynamics of the pupillary response to a brief light stimulus in healthy subjects. *Investigative Ophthalmology & Visual Science, 53*(11), 7343–7347. https://doi.org/10.1167/iovs.12-10881

Chougule, P. S., Najjar, R. P., Finkelstein, M. T., Kandiah, N., & Milea, D. (2019). Light-induced pupillary responses in Alzheimer's disease. Frontiers in neurology, 10, 360. https://doi.org/10.1038/s41598-020-80001-5. https://doi.org/10.3389/fneur.2019.00360

Christofi, G. (2022). A clinical approach to coma: neurological assessment of the comatose patient. Anaesthesia & Intensive Care Medicine, 23(12), 764–775. https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2022.10.002

Conti, F., Battaglini, P. P., & Mora, E. (2010). *Oftalmología en la práctica de la medicina general* (1.ª ed.). McGraw-Hill Interamericana de España S.L

Espinosa, J., Roig, A. B., Pérez, J., & Mas, D. (2015). A high-resolution binocular videooculography system: Assessment of pupillary light reflex and detection of an early incomplete blink and an

upward eye movement. *Biomedical Engineering Online, 14*(1), 1–12. https://doi.org/10.1186/s12938-015-0016-6

Fan, X., & Yao, G. (2010). Modeling transient pupillary light reflex induced by a short light flash. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 58*(1), 36–42. https://doi.org/10.1109/TBME.2010.2080678

Ren, P., Barreto, A., Gao, Y., & Adjouadi, M. (2012). Affective assessment by digital processing of the pupil diameter. *IEEE Transactions on Affective Computing, 4*(1), 2–14. https://doi.org/10.1109/T-AFFC.2012.25

Fan, X., Hearne, L., Lei, B., Miles, J. H., Takahashi, N., & Yao, G. (2009). Weak gender effects on transient pupillary light reflex. *Autonomic Neuroscience: Basic & Clinical, 147*(1-2), 9-13. https://doi.org/10.1016/j.autneu.2008.12.010

Graue Wiechers, E. (2019). Exploración de los reflejos pupilares. En E. Graue Wiechers (Ed.), Oftalmología en la práctica de la medicina general (5.ª ed., pp. [rango de páginas]). McGraw-Hill Interamericana de España.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2023, 6 de julio). *Encuesta Nacional sobre Salud y Envejecimiento en México (ENASEM) y encuesta de evaluación cognitiva 2021. Comunicado de prensa núm. 394/23* [Comunicado de prensa]. https://www.inegi.org.mx/programas/enasem/2021

Kuze, M., Negishi, K., Koyasu, T., Kondo, M., Tsubota, K., & Ayaki, M. (2021). Cataract type and pupillary response to blue and white light stimuli. Scientific Reports, 11(1), 1828. https://doi.org/10.1038/s41598-020-79751-8

Martínez-Ricarte, F., Castro, A., Poca, M. A., Sahuquillo, J., Expósito, L., Arribas, M., & Aparicio, J. (2013). Pupilometría por infrarrojos. Descripción y fundamentos de la técnica y su aplicación en la monitorización no invasiva del paciente neurocrítico [10.1016/j.nrl.2010.07.028]. Neurología, 28(1), 41–51. https://doi.org/10.1016/j.nrl.2010.07.028

Maruani, J., Vissouze, L., Hebert, M., Rach, H., Zehani, F., Lejoyeux, M., Bourgin, P., & Geoffroy, P. A. (2025). Pupillary response to blue light as a biomarker of seasonal pattern in Major Depressive Episode: A clinical study using pupillometry. Psychiatry Research, 344, 116333. https://doi.org/10.1016/j.psychres.2024.116333

Pinheiro, H. M., & da Costa, R. M. (2021). Pupillary light reflex as a diagnostic aid from computational viewpoint: A systematic literature review. *Journal of Biomedical Informatics, 117*, 103757. https://doi.org/10.1016/j.jbi.2021.103757

Quiroz-Gonzalez, E. A., Quiroz-Reyes, M. A., Gonzalez-Gonzalez, C., Loaeza-Castrejon, R., Haro-Morlett, L., Bautista-Barba, A., Fulda-Graue, E., & Graue-Wiechers, F. (2021). Unilateral Retinoblastoma Presentation in a Latin-American Teenager: A Case Report and Literature Review. International Journal of Ophthalmology & Visual Science, 6(4), 267–272. https://doi: 10.11648/j.ijovs.20210604.23

Schafer, R. W. (2011). What is a savitzky-golay filter?[lecture notes]. IEEE Signal processing magazine, 28(4), 111–117. https://10.1109/MSP.2011.941097

Secretaría de Salud. (2020). *Día Mundial de la Visión 2020*. Gobierno de México. https://www.gob.mx/salud/es/articulos/dia-mundial-de-la-vision-2020?idiom=es

Tan, T. E., Finkelstein, M. T., Tan, G. S. W., Tan, A. C. S., Chan, C. M., Mathur, R., Wong, E. Y. M., Cheung, C. M. G., Wong, T. Y., & Milea, D. (2022). Retinal neural dysfunction in diabetes revealed

with handheld chromatic pupillometry. Clinical & Experimental Ophthalmology, 50(7), 745–756. https://doi.org/10.1111/ceo.14116

Tripolone, M. C., Issolio, L. A., Aguero, C. A., Lavaque, A., & Barrionuevo, P. A. (2023). Pupilometría cromática en pacientes con sospecha de glaucoma primario de ángulo abierto. https://doi.org/10.70313/2718.7446.v16.n04.258

Vimalajeewa, D., McDonald, E., Bruce, S. A., & Vidakovic, B. (2022). Wavelet-based approach for diagnosing attention deficit hyperactivity disorder (ADHD). Scientific Reports, 12(1), 21928. https://doi.org/10.1038/s41598-022-26077-2

Zarifkar, P., Othman, M. H., Hansen, K. I. T., Amiri, M., Stückler, S. G., Fabritius, M. L., Sigurdsson, S. T., Hassager, C., Birkeland, P. F., & Hauerberg, J. (2024). The Pupillary Light-Off Reflex in Acute Disorders of Consciousness. *Neurocritical Care, 1–12*. https://doi.org/10.1007/s12028-024-02133-9

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons
Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.