

¿Cómo reacciona la pupila a la luz? Un enfoque a través del color y la tecnología

***Carlos Omar González Morán**

Rodrigo Hernández Moncayo

Centro Universitario UAEMEX Valle de México
cogonzalezm@uaemex.mx

Juan Carlos Belen Luna

CINVESTAV-IPN

José de Jesús Agustín Flores Cuautle

“Secihti - Instituto Tecnológico de Orizaba”

Asdrúbal López Chau

Centro Universitario UAEM Zumpango

Resumen

La luz es fundamental para la visión: al entrar al ojo, atraviesa sus diferentes estructuras hasta llegar a los fotorreceptores, que convierten esa luz en señales que el cerebro interpreta, permitiéndonos reconocer y comprender nuestro entorno. La pupila, que es el orificio en el centro del iris, regula cuánta luz ingresa al ojo. Estudiar el comportamiento de la pupila ha abierto nuevas oportunidades en campos tan diversos como el marketing, la medicina y la educación.

Esta investigación propone una alternativa basada en video-oculografía, una técnica de registro no invasivo que utiliza cámaras para estudiar el movimiento de los ojos, para analizar los reflejos pupilares cuando se exponen a estímulos de luz de colores primarios (rojo, verde y azul, conocidos como RGB). El objetivo es conocer, comprender y obtener datos significativos sobre el comportamiento de la pupila.

A partir de estos datos, es posible realizar análisis estadísticos que, en el futuro, permitirán desarrollar sistemas basados en inteligencia artificial para prevenir problemas visuales y apoyar el diagnóstico temprano de enfermedades oculares.

Introducción

La visión juega un papel crucial en el desarrollo humano, ya que permite percibir el entorno y comprender la realidad. Desde las primeras etapas de la vida, la visión impulsa el desarrollo de habilidades cognitivas como la percepción, la atención y la memoria. Estas capacidades evolucionan desde la infancia hasta la adultez, siendo un motor clave en el progreso intelectual y tecnológico de la humanidad.

Según el blog de la Secretaría de Salud [1], en 2022 había 200 millones de personas en el mundo con algún problema visual, según datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS). En México, existen 12 millones 237 mil personas con una deficiencia visual. Las principales afecciones incluyen errores de refracción (como miopía, hipermetropía y astigmatismo) y enfermedades más graves como catarata senil, degeneración macular, glaucoma, retinopatía diabética y opacidades en la córnea.

Muchas de estas condiciones pueden prevenirse o estabilizarse mediante un diagnóstico temprano. Por ello, es fundamental implementar técnicas que permitan detectar a tiempo posibles problemas visuales, evitando que avancen hasta provocar ceguera u otras complicaciones severas.

Actualmente, existen técnicas no invasivas para estudiar el reflejo pupilar, las cuales pueden asociarse con distintas enfermedades. Por ejemplo, en [2] se presenta un estudio sobre alteraciones de los reflejos pupilares en pacientes con depresión en la vejez. En [3], se describe un sistema de estimulación visual y registro de movimientos oculares mediante video-oculografía infrarroja (una técnica que utiliza luz infrarroja para capturar los movimientos del ojo) con el objetivo de detectar problemas neurodegenerativos. El trabajo de [4] demuestra, mediante pupilografía infrarroja, cómo es posible identificar alteraciones en pacientes con neuromielitis óptica y esclerosis múltiple. Asimismo, en [5] se desarrolla un sistema económico para estudiar y cuantificar el reflejo pupilar en personas con diabetes.

Este trabajo propone la implementación de un sistema computacional para estudiar y registrar de manera no invasiva el comportamiento y los reflejos pupilares. Esta información permitirá, en el futuro, aplicar técnicas de Inteligencia Artificial (IA) para reconocer patrones y establecer conexiones con posibles enfermedades. La organización del documento es la siguiente: primero se presenta un resumen sobre cómo viaja la luz a través del ojo; luego se describen algunas técnicas de estudio pupilar no invasivas (como el seguimiento ocular, la video-oculografía y la pupilometría); y, finalmente, se detalla la implementación del sistema computacional para obtener datos del área pupilar.

El paso de la luz en el ojo y los fotorreceptores. La luz es esencial para la visión. Al ingresar al ojo, atraviesa diversas estructuras que transforman y procesan la información. Estas partes se dividen en zonas externas, medias e internas del ojo, como se muestra en las Figuras 1 y 2.

El ojo tiene forma semiesférica, con un diámetro de entre 26 y 28 milímetros. En su parte externa se encuentra la córnea, una capa transparente y curva que permite enfocar la luz hacia el interior. Detrás de la córnea está la esclerótica (o esclera), una capa blanca que protege el ojo y bloquea el paso de la luz [6].

En el centro del ojo se ubica el iris, una membrana que le da color al ojo.

En el centro del iris está la pupila, un orificio que regula el paso de la luz mediante dos músculos: el esfínter (que contrae la pupila, miosis) y el dilatador (que la expande, midriasis), para proteger los fotorreceptores de la retina.

Detrás del iris se encuentra el cuerpo ciliar, que junto con su músculo, permite el proceso de acomodación (ajuste de la curvatura del cristalino) para enfocar objetos a distintas distancias.

El cristalino es una lente transparente que permite enfocar la luz en un punto específico [7].

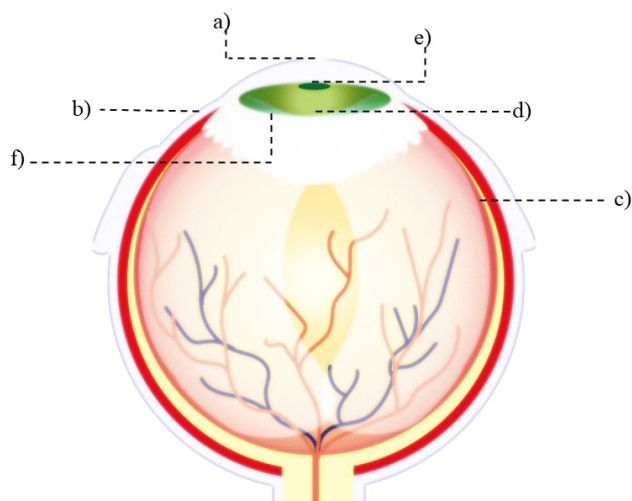


Figura 1. Localización anatómica de las partes exterior y media del ojo: a) córnea, b) esclerótica, c) coroides, d) iris, e) pupila y f) cuerpo ciliar.

La retina es la capa más interna del ojo y está compuesta por fotorreceptores (células que perciben la luz) y células ganglionares. La retina capta las imágenes formadas por la luz, las convierte en impulsos eléctricos y los envía al cerebro a través del nervio óptico. En el centro de la retina está la mácula lútea, encargada de formar imágenes nítidas y reconocer detalles como colores y formas. En su centro se encuentran la fovea y la foveola, donde hay una alta concentración de fotorreceptores y células ganglionares, lo que permite una visión más precisa.

Existen dos tipos de fotorreceptores:

- **Conos**, que permiten la visión central, la percepción de colores (rojo, verde y azul) y funcionan bien con luz intensa.
- **Bastones**, que permiten la visión periférica y son más sensibles en condiciones de poca luz, pero solo perciben tonos de gris.

La luz atraviesa la córnea y el cristalino, que funcionan como lentes para enfocar los rayos luminosos en la retina. Esta interpreta las señales y, mediante los conos y bastones, distingue formas, colores y distancias.

Finalmente, la información se transmite al cerebro a través del nervio óptico [6][7].

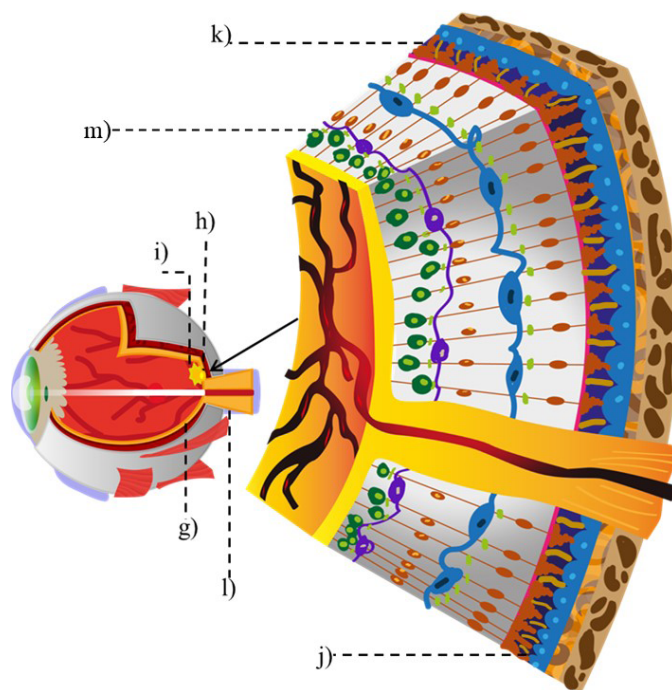


Figura 2. Localización de las partes del ojo mencionadas en la zona interna: g) retina, h) fovea, i) mácula, j) bastones, k) conos, l) nervio óptico, m) células ganglionares.

Técnicas de estudio pupilar

El ojo y la visión son fundamentales para el ser humano, ya que permiten una vida independiente y un desarrollo social y cognitivo plenos. Por esta razón, se han impulsado numerosas investigaciones orientadas a encontrar soluciones a problemas médicos y visuales [8]. Entre estas investigaciones destacan técnicas como el seguimiento ocular, la video-oculografía y la pupilometría, todas ellas diseñadas para detectar los movimientos oculares y pupilares de manera no invasiva.

El **seguimiento ocular** (*eye-tracker*) es una técnica que utiliza sensores, cámaras infrarrojas y algoritmos para detectar hacia dónde está mirando una persona. Permite medir el tiempo que una persona pasa observando cierta información y analizar el comportamiento de la mirada. En medicina [9], se ha desarrollado un prototipo que integra un casco de realidad virtual con un eye-tracker para registrar los movimientos oculares y de las manos. Esta investigación sugiere que los patrones de movimiento ocular pueden ser biomarcadores de enfermedades neurodegenerativas como el Parkinson y el Alzheimer.

La **pupilometría** es una técnica que utiliza diferentes longitudes de onda de luz para estimular la pupila. En oftalmología, es común emplear esta herramienta para evaluar la salud ocular mediante estímulos de luz de distintos colores (cromáticos). Por ejemplo, en [10], se emplea luz en el espectro RGB (rojo, verde y azul) para realizar estudios en personas con glaucoma y analizar si es posible detectar la enfermedad en etapas tempranas.

La **video-oculografía** (VOG) permite registrar los movimientos del ojo o la pupila mediante una cámara. Para el registro se pueden utilizar videos o fotografías, y el análisis puede incorporar algoritmos de IA para evaluar la información obtenida. Por ejemplo, en [11], se presenta una opción para realizar estudios de retinopatía (enfermedad de la retina) en infantes mediante telemedicina, utilizando un conjunto de imágenes de retina para entrenar un algoritmo, logrando buenos resultados. Este trabajo es relevante, ya que muestra cómo las consultas remotas pueden apoyar el diagnóstico en lugares donde no hay acceso a tecnología médica avanzada.

En el estudio de los reflejos pupilares, se ha trabajado en la búsqueda de biomarcadores, es decir, características o señales biológicas que permiten identificar indicios de una enfermedad. En [12], se demuestra cómo la variación en el tamaño de la pupila tras una conmoción cerebral puede servir como biomarcador. El estudio analiza los cambios en el área y el reflejo pupilar según la edad y el sexo de los participantes.

Actualmente, en el **Centro Universitario UAEM Valle de México**, se está implementando una infraestructura y un sistema computacional para estudiar la pupila mediante estímulos cromáticos. Esto permitirá obtener datos relevantes sobre el sistema visual y, en el futuro, identificar biomarcadores pupilares que ayuden a prevenir problemas visuales.

Implementación

Para la implementación del sistema computacional, se replicó el trabajo presentado en [13], que describe un sistema experimental para evaluar los reflejos pupilares (conocidos en inglés como Pupillary Light Reflex, PLR) utilizando estímulos de luz en colores RGB. Los ensayos fueron aprobados por el Comité de Ética en Investigación (CONBIOETICA-15-CEI-002-20210531) y realizados conforme a la Declaración de Helsinki, un conjunto de principios éticos para la investigación médica en seres humanos.

Metodología y arquitectura

La metodología utilizada en [13] es de tipo **top-down**, es decir, se comienza desde una perspectiva general para luego desglosar los elementos específicos. En este caso, se construyó un sistema de **VOG** para grabar los reflejos pupilares y, posteriormente, analizar los datos extraídos de dichas grabaciones. La arquitectura, representada en la Figura 3, incluye los siguientes pasos:

1. Implementar un sistema VOG para registrar el efecto de dilatación de la pupila ante estímulos de luz RGB.
2. Seleccionar y descartar fotogramas que puedan afectar el análisis (por ejemplo, parpadeos o movimientos involuntarios).
3. Implementar un algoritmo de detección y cálculo del área pupilar, apoyado en técnicas de visión artificial.
4. Almacenar la información en una base de datos.
5. Realizar análisis estadísticos sobre los datos obtenidos.

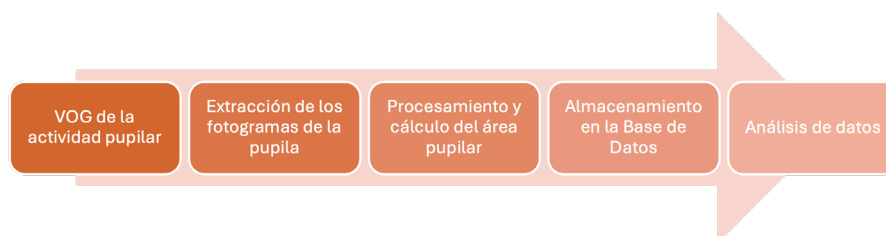


Figura 3. Arquitectura utilizada para la implementación del sistema de evaluación de reflejos pupilares basada en [13].

Instrumentación y aplicación

El sistema VOG para registrar los estímulos pupilares se instala dentro de una jaula de Faraday, que es un recinto que bloquea interferencias electromagnéticas, garantizando que el experimento se realice en completa oscuridad. Dentro de esta jaula, se coloca un campímetro (instrumento para medir la percepción visual en distintos puntos del campo visual) con iluminación de fondo mediante una tira de luces LED.

Para la grabación, se utiliza una cámara Canon Rebel T6 montada sobre una base deslizante, equipada con un lente macro de 50 mm para obtener tomas detalladas. Cada grabación dura 10 segundos por estímulo de color y se realiza en alta definición (HD) a 60 fotogramas por segundo (FPS).

La proyección de los estímulos de luz RGB se realiza mediante un LED de un watt, calibrado a 93.19 cd/m^2 , controlado por una placa Arduino. El circuito está colocado a 30 cm de distancia del ojo del sujeto, junto a un teléfono inteligente. Los estímulos se aplican durante 10 milisegundos, tres veces, en un periodo de 10 segundos por cada color. Frente al lente de la cámara se coloca un anillo con 8 LEDs infrarrojos para mejorar la visibilidad en la oscuridad.

Para supervisar el proceso, una computadora permite duplicar el video en tiempo real y almacenar los resultados. El sujeto se sienta frente al lente macro en una base mentonera, desinfectada previamente, que sostiene la cabeza para evitar movimientos. La Figura 4 ilustra la disposición de los elementos.

Después de la grabación, el análisis de los datos puede realizarse fuera de la jaula de Faraday. En esta etapa, se eliminan los fotogramas donde el participante parpadea o cierra los ojos para evitar errores en el análisis. El cálculo del área pupilar se realiza utilizando el lenguaje de programación Python y la librería OpenCV, una herramienta de visión artificial que permite analizar imágenes y videos.

Los datos obtenidos se almacenan en una base de datos para su posterior análisis estadístico.

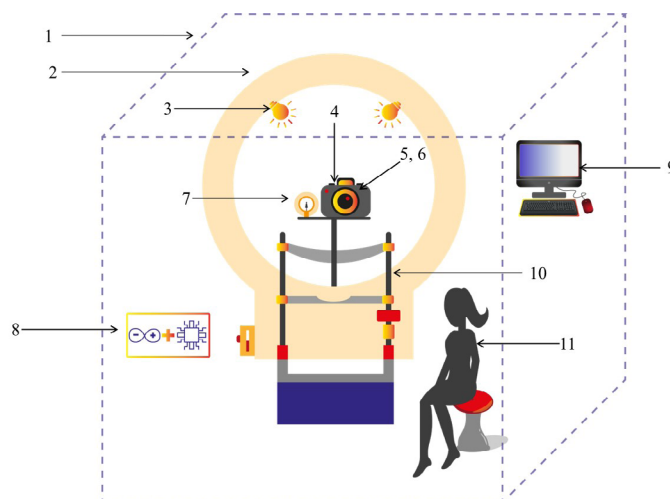


Figura 4. Representación gráfica de la disposición espacial de los elementos necesarios para la obtención de los estímulos pupilares: 1.- jaula de Faraday, 2.- campímetro, 3.- iluminación de fondo, 4.- cámara Canon Rebel T6, 5.- lente macro, 6.- anillo de luz infrarrojo, 7.- estímulo RGB, 8.- control con Arduino, 9.- computadora, 10.- sujeto de prueba.

En el CU UAEM Valle de México, esta investigación representa un paso inicial en el estudio del área pupilar mediante visión artificial. Actualmente, se cuenta con la infraestructura para realizar experimentos; sin embargo, es necesario definir la población de estudio. Se propone comenzar con estudiantes universitarios (de 18 a 22 años) y personal docente y administrativo, formando distintos grupos de prueba. El objetivo es obtener datos sobre los reflejos pupilares, entender los procesos de midriasis (dilatación de la pupila) y miosis (contracción), y encontrar patrones que puedan contribuir a la detección temprana de enfermedades a partir del estudio de los reflejos pupilares. La Figura 5 muestra un fotograma generado por esta investigación.



Figura 5. Fotograma de reflejo pupilar obtenido de la implementación del sistema computacional de [13].

Conclusiones

La visión es un sentido fundamental en el desarrollo humano, ya que sin ella la interacción con el entorno se vería limitada y la percepción de la realidad cambiaría drásticamente. Por ello, la investigación sobre el ojo y las enfermedades visuales es esencial y debe ser divulgada de manera constante.

Este proyecto tiene un amplio potencial de crecimiento. Aunque se encuentra en una etapa inicial, ya se han logrado capturar fotogramas de reflejos pupilares (PLR) de manera satisfactoria. El análisis de estos reflejos podría ayudar a identificar patrones y definir biomarcadores, lo que facilitaría la detección, prevención o diagnóstico de enfermedades mediante técnicas de Inteligencia Artificial.

Agradecimientos

Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) por la beca otorgada para realizar esta investigación. Folio: EESP2024-1005.

Referencias

- [1] Secretaría de Salud, "Día Mundial de la Visión 2020", Gobierno de México. [En línea]. Disponible: <https://www.gob.mx/salud/es/articulos/dia-mundial-de-la-vision-2020?idiom=es>. [Fecha de acceso: Nov 14, 2024].
- [2] Y.-T. Lee, Y.-H. Chang, H.-J. Tsai, S.-P. Chao, D. Y.-T. Chen, J.-T. Chen, Y.-G. Cherng, and C.-A. Wang, "Altered pupil light and darkness reflex and eye-blink responses in late-life depression," *BMC Geriatrics*, vol. 24, no. 545, 2024. doi: <https://doi.org/10.1186/s12877-024-05034-w>
- [3] F. H. Sánchez, T. V. Romaguera, and C. R. V. Seisdedos, "Sistema de estimulación y registro del movimiento ocular con el empleo de la videoculografía infrarroja," *MediSan*, vol. 24, no. 03, pp. 515-528, 2020.
- [4] S. Samadzadeh, R. Abolfazli, S. Najafina, C. Morcinek, and P. Rieckmann, "Quantification of pupillary light reflex abnormalities in patients with neuromyelitis optica spectrum disorder and multiple sclerosis automated infrared pupillometry," *Journal of the Neurological Sciences*, vol. 405, Suppl., p. 53, Oct. 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jns.2019.10.316>
- [5] M. Jara, R. Araya, C. García, et al., "Probarán medición de reactividad pupilar como ayuda en la detección de retinopatía diabética," *Medicina Universidad de Chile*, 2021. [En línea]. Disponible: <https://medicina.uchile.cl/noticias/183263/probaran-medicion-de-reatividad-pupilar-para-pesquisar-retinopatia-> [Fecha de acceso: Abril 03, 2025].
- [6] E. Graue, *Oftalmología en la práctica de la medicina general*, 5ta ed. Ciudad de México: Editorial Facultad de Medicina, UNAM | McGraw-Hill, 2019.
- [7] F. Conti, P.P. Battaglini and E. Mora, *Oftalmología en la práctica de la medicina general*, 1ra ed. España: Editorial McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2010
- [8] H. P. Monteiro, E. N. C. Rossi N.R, A. J. Paranhos, A.F. Ueslei, G. L. Teodoro and R. C. Martins, "Evaluating machine learning techniques for enhanced glaucoma screening through Pupillary Light Reflex analysis," *ARRAY*, Sep. 2024. doi: <https://doi.org/10.1016/j.array.2024.100359>
- [9] R. Santhoshikka, C. Laranya, C. Harshavarthini, R. Preetha, and K. Saran Kumar, "Eye tracking and its applications," *IJAR-SET*, vol. 8, no. 8, pp. 126 -130, Ago. 2021. doi: <https://doi.org/10.17148/IARJSET.2021.8824>
- [10] M. C. Tripolone, L. A. Issolio, C. A. Agüero, A. Lavaque and P. A. Barrionuevo, "Pupílometría cromática en pacientes con sospecha de glaucoma primario de ángulo abierto," *Oftalmología Clínica y Experimental*, vol. 16, no. 4, pp. 346-356, Dic. 2023. doi: <https://doi.org/10.17148/IARJSET.2021.8824>
- [11] A. S. Coyner, T. Murickan, M. A. Oh, B. K. Young, S. R. Ostmo, P. Singh, R. V. P. Chan, D. M. Moshfeghi, P. K. Shah, N. Venkatesh, M. F. Chiang, J. Kalpathy-Cramer, and J. P. Campbell, "Multinational external validation of autonomous retinopathy of prematurity screening," *JAMA Ophthalmol.*, vol. 141, no. 3, pp. 264-272, 2023. doi: <https://doi.org/10.1001/jamaophthalmol.2023.0100>
- [12] F. R. Carrick, S. F. Azzolino, M. Hunfalvy, G. Pagnacco, E. Oggero, R. C. N. D'Arcy, M. Abdulrahman, and K. Sugaya, "The pupillary light reflex as a biomarker of concussion," *Brain Injury*, vol. 37, no. 1, pp.12-19, 2024. doi: <https://doi.org/10.1080/02699052.2024.1909234>
- [13] J. C. Belen-Luna, C. O. González-Morán, V. Lima-Gómez and E. Suaste-Gómez, "Pattern Recognition of Pupillary Reflex Dynamics to Isoluminescent RGB Chromatic Stimuli," presentada en In Mexican Conference on Pattern Recognition, Jun. 2024, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-62836-8_13

