

2

VISIÓN HUMANA Y MOVIMIENTOS OCULARES

La visión humana es un proceso que integra los ojos y el cerebro mediante una red de neuronas, receptores y células especializadas. Este sistema depende de un buen número de procesos cognoscitivos y emocionales como la atención, la memoria y el procesamiento de información que, en conjunto, facilitan el ahorro de recursos cognoscitivos para prestar atención consciente a tareas que así lo requieran.

En un porcentaje alto, la visión humana procesa información de manera automática para “la interpretación del mundo exterior mediante sistemas internos de codificación y representación a través de la extracción de información contenida en las imágenes retinianas” (Pons y Martínez, 2004, p. 15).

El ojo es el órgano básico del sentido de la visión. Es capaz de percibir cambios de luz y transformarlos en impulsos eléctricos, lo que permite obtener una gran cantidad de información sobre el mundo externo, como la distancia a la que se encuentran las cosas, la forma, el tamaño y el color de los objetos y la velocidad a la que estos se mueven; ello garantiza que el ser humano tenga una representación confiable de su entorno para tomar decisiones con celeridad (Pons y Martínez, 2004).

El ojo humano está conformado por diversas estructuras que hacen posible la visión (Figura 3). La luz que se refleja en los objetos es percibida por el ojo mediante la córnea, encargada de enfocar la luz. Luego, la luz pasa por la pupila —ubicada en la parte central del iris— y se proyecta hacia la retina. Esta última contiene una gran cantidad de células sensibles a la luz llamadas conos y bastones, que tienen como función convertir la luz en señales eléctricas que son enviadas a la corteza visual por medio del nervio óptico. Dentro de la retina se encuentra la mácula, en cuyo centro se ubican la fovea y la parafovea (Abad, 2007; Holmqvist et al., 2011).

Visión humana y movimientos oculares

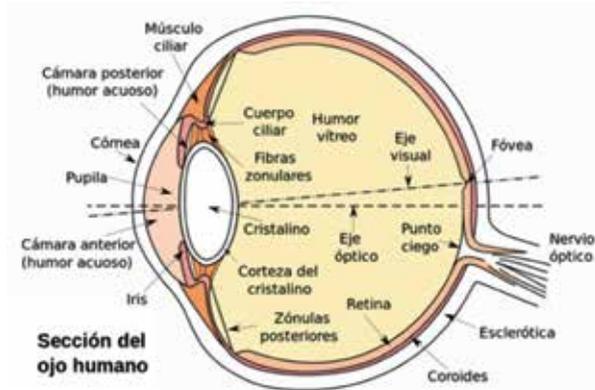


Figura 3. Anatomía del ojo humano. Fuente: AStardus. (2007). *Section View of the Human Eye*. Recuperado de <https://es.wikipedia.org/wiki/Ojo>

La fovea es una depresión anatómica localizada cerca del centro de la mácula y contiene bastones y conos, células fotorreceptoras con gran sensibilidad. La fovea es responsable de la visión central aguda o visión foveal, que cubre entre 2 y 5 grados de los 180 que es capaz de percibir el ojo humano a partir de un punto de fijación (Figuras 3, 4, 5 y 6). Esta región es indispensable para que los humanos desempeñen actividades visuales que requieren atención y precisión, como la lectura y la conducción, ya que es el área en la que el ojo tiene mayor resolución y nitidez (Figura 6) (Calvo y Lang, 2005). Es considerada el centro fisiológico del ojo y define el eje de fijación (línea imaginaria que une el centro de rotación con el punto de fijación) (Figura 4); ello hace que los objetos que se proyectan sobre la fovea den la impresión de estar frente a nosotros y en línea recta.

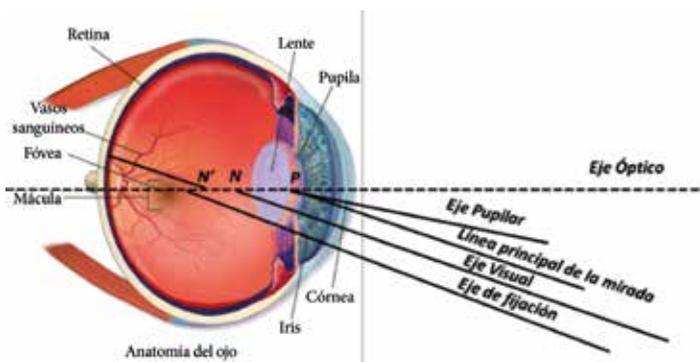


Figura 4. Ejes y ángulos del ojo. Fuente: Blausen.com staff. (2014). Medical Gallery of Blausen Medical 2014. *WikiJournal of Medicine*, 1(2), p. 10. Recuperado de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Blausen_0389_EyeAnatomy_02.png

La parafóvea es una región en forma de cinturón alrededor de la fovea. Está compuesta por más de cinco filas de células ganglionares y contiene la mayor densidad de conos. Se extiende en un radio de 1,25 milímetros de la fovea central (Figuras 3 y 4) y comprende 5 grados alrededor del punto de fijación, lo que permite recolectar información del campo visual. Junto con la periferia, está implicada en la percepción fuera del foco de atención. Cuanto más lejos del centro aparecen los objetos, más probable es que sus detalles se desvanezcan y su identificación será progresivamente más deficiente (Figuras 6, 7 y 8) (Calvo, Nummenmaa y Hyönä, 2008).

Para que los estímulos del entorno sean fijados en la fovea, es necesario que se produzcan movimientos oculares, así como sistemas que integran la cabeza, los ojos y los oídos para proveer información sobre el entorno visoespacial; los estímulos visuales son conducidos del campo periférico al campo visual central.

El primer sistema es el vestíbulo-ocular (VOR), asociado con el reflejo oculovestibular. Produce un movimiento conjugado lento de ambos ojos en oposición a la rotación de la cabeza. Tiene como principal función estabilizar las imágenes en la fovea mientras hay cambios en el movimiento de la cabeza. El sistema vestibular, situado en el oído, permite conocer la dirección de los movimientos de la cabeza; ello activa el sistema oculomotor para compensar dichos movimientos (coordinación de los de los ojos con los de la cabeza) y mantener la experiencia perceptiva visual (Micheli, Nogués, Asconapé, Fernandez y Biller, 2003; Pons y Martínez, 2004; Hung y Ciuffreda, 2013).

El segundo sistema es el optocinético (OKN, por su nombre en inglés), que posibilita fijar la mirada en un punto del campo visual (Leigh, y Zee, 2015). Estos dos sistemas forman parte de la categoría de movimientos involuntarios.

El tercer sistema es el de vergencia. Permite rastrear y fijar objetos en la cercanía (convergencia) o en la distancia (divergencia), a partir de movimientos desconjugados lentos (Horsley et al., 2013; Khazali, Pomper, Smilgin, Bunjes y Thier, 2016).

El cuarto sistema es el de persecución. Produce movimientos lentos que tienen como meta mantener el objeto proyectado sobre la fovea.

El último sistema es el de movimientos sacádicos o de refijación, que permiten desplazar con rapidez la fijación de un punto a otro del campo visual. Estos dos últimos son movimientos voluntarios (Figuerolla, 2002; Gila, Villanueva y Cabeza, 2009; Zarranz, 2013; Leigh y Zee, 2015).

En los tres tipos de movimientos oculares desencadenados por estos cuatro sistemas participan seis pares de músculos extraoculares (Figura 5). Los músculos rectos mediales y laterales están involucrados en las rotaciones horizontales (aducción y abducción); los movimientos verticales (elevación y depresión) se producen por

contracciones cooperativas de combinaciones del músculo recto superior y del inferior y pares de músculos oblicuos superiores e inferiores; y los movimientos de torsión (intorsión y extorsión) están asociados con neuronas motoras que inervan los músculos extraoculares del III par (oculomotor), IV par (troclear) y VI par (abducentes) (Sparks, 2002).

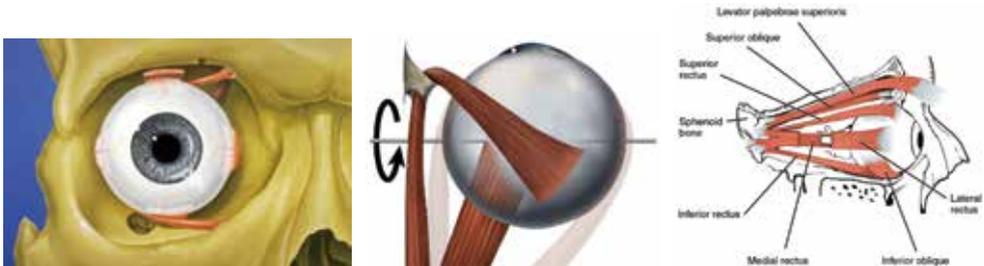


Figura 5. Músculos relacionados con los movimientos oculares. Fuente: Lynch, P. J. (2006a). *Eye Movements Depressors*. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Eye_movements_depressors.jpg; Lynch, P. J. (2006b). *Normal Anatomy of the Human Eye and Orbit, Anterior View*. Recuperado de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eye_orbit_anatomy_anterior2.jpg; OpenStax. (2016). *Open STax Anatomy and Physiology*. Recuperado de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1107_The_Extrinsic_Eye_Muscles.jpg

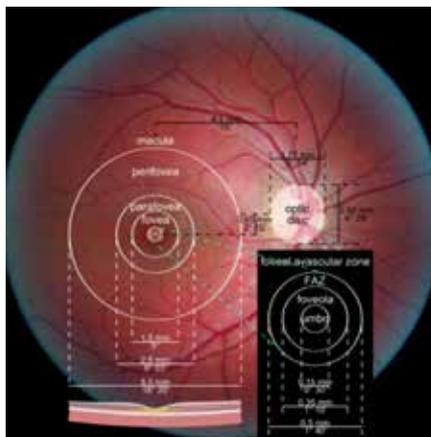


Figura 6. Ubicación de la fovea y la parafóvea en el ojo humano. Fuente: Yandle. (2008). *My Right Eye*. Recuperado de <https://www.flickr.com/photos/yandle/2607304048/in/photostream/>
Foto de la retina del ojo humano, con diagramas superpuestos que muestran la posición y el tamaño de la mácula, la fovea y el disco óptico.

Carolina Gutiérrez de Piñeres Botero

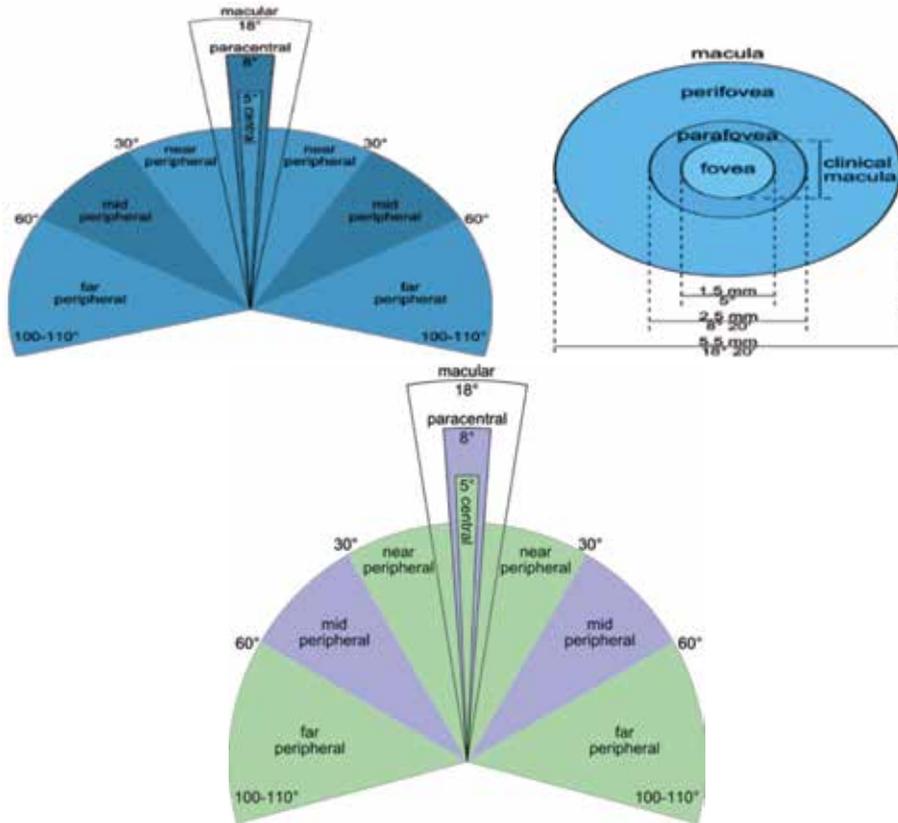


Figura 7. Visión foveal y parafoveal en el ojo humano. Fuente: Zyxwv99. (2014). *Human Field View (FOV) for Both Eye Showing Fa, Mind- and Near Peripheral Vision, Macular, Paracentral and Central (Foveal) Vision, as Well as Range of Foveal and Foveal Umbo*. Recuperado de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Peripheral_vision.svg

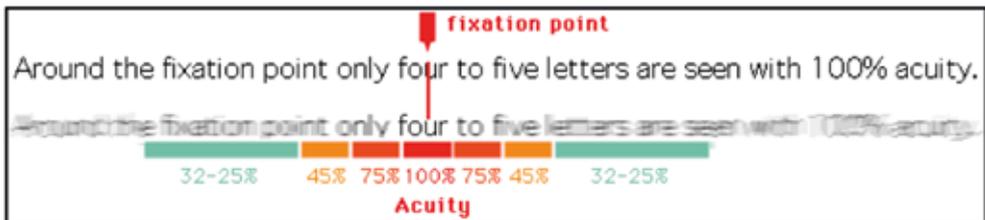


Figura 8. Punto de fijación y exactitud. Fuente: Hunziker, H. (2008). *Eye Fixations Reading*. Recuperado de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EyeFixationsReading.gif>

Los movimientos oculares están vinculados con la fijación, los movimientos sacádicos, el seguimiento y el restablecimiento de la torsión del ojo.

a. Fijación. Es la acción por la cual es posible enfocar las imágenes u objetos en la fovea (Figuras 5 y 6). Se produce durante aproximadamente 300 mseg, tiempo que el ojo permanece relativamente inmóvil. De la fijación podemos obtener los datos de duración y de frecuencia (Figura 8). Además, está vinculada al estudio de la atención.

La duración de la fijación ofrece información acerca de los estímulos que resultan de mayor interés o importancia para el participante. Está vinculada con alternaciones en ciertas regiones cerebrales encargadas de procesar la información de un objeto hacia el cual un observador dirige la mirada (Cooke, 2005). Sobre este aspecto se profundizará más adelante.

La frecuencia se refiere al número total de fijaciones en la escena y a su eficiencia. Cooke (2006) sostiene que cuanto menor es el número de fijaciones, más eficiente es la búsqueda; esto dependerá del tipo de información que se procese acerca de un objeto y del mecanismo que se utilice para ello, es decir, si la información se elabora a partir de características como el color, el tamaño, la orientación o el movimiento, de mecanismos automáticos (bottom-up) o de mecanismos controlados (top-down). Estos mecanismos se ampliarán en el apartado de determinantes cognitivos de la fijación y de los movimientos oculares.

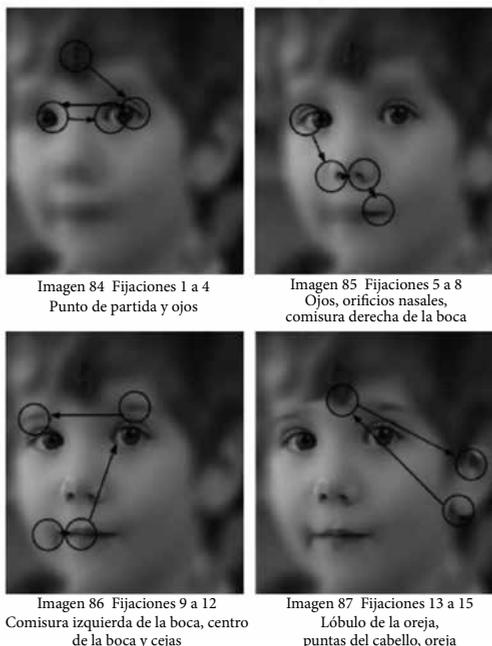


Figura 9. Visión a partir del punto de fijación. Fuente: Hunziker, H. (2006). *Im Auge des Lesers: Foveale und Periphere Wahrnehmung - vom Buchstabieren zur Lesefreude*. Recuperado de https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Face_recognition_first_5_seconds.jpg

b. Movimientos sacádicos. Son pequeños saltos rápidos y precisos sometidos tanto a un control voluntario como involuntario o inducido, responsables del reconocimiento y del procesamiento de información visual y asociados con movimientos de la cabeza.

Están encargados de conseguir un cambio de blanco para percibir diferentes imágenes, así como de enfocar una de ellas para diferenciar características como la forma, el color, el tamaño, la ubicación y la distancia (Tabla 1) (Gila et al., 2009).

Los movimientos sacádicos voluntarios y autoinducidos son provocados por la aparición de un estímulo específico o como respuesta a órdenes, por ejemplo, “mire a la derecha” o “mire hacia abajo”. No están determinados por cambios en la periferia, sino que están guiados internamente por procesos cognoscitivos como la memoria, la atención, la monitorización y el control inhibitorio (Crevits y Vandicrendonck, 2005; Cooke, 2005). Los movimientos sacádicos voluntarios están acompañados de movimientos prosacádicos, encargados de dirigir la mirada hacia un nuevo estímulo, así como de movimientos antisacádicos, encargados de alejar la mirada de un estímulo (Gila et al., 2009).

Por otro lado, los involuntarios son respuestas reflejas de orientación desatadas por la aparición súbita de un estímulo en la periferia del campo visual, por un cambio inesperado en el ambiente o por la presencia de un estímulo novedoso (Crevits y Vandicrendonck, 2005). Se relacionan con la supervivencia, pues permiten detectar rápidamente señales de peligro (Duchowski, 2017).

En la Tabla 1 se presenta un resumen de los parámetros que caracterizan los movimientos sacádicos.

c. Seguimientos. Son los movimientos oculares lentos conjugados de rastreo, que tienen como fin mantener la fijación en un blanco en movimiento (Micheli et al., 2003). Involucran regiones del cerebro como la corteza visual primaria, la corteza visual extraestriada, los núcleos pontinos dorsales, el flóculo, el vermis del cerebelo y los núcleos vestibulares.

Tabla 1. Parámetros para la caracterización de los movimientos y micromovimientos asociados con la fijación visual

Movimientos sacádicos	
Amplitud máxima	30 % desplazamientos superiores requieren movimiento de la cabeza.
Duración	30-120 ms, según amplitud del desplazamiento.
Velocidad angular máxima alcanzada durante una sácada	Hasta 1000 grados/s
Relación principal	Relación constante entre amplitud y velocidad máxima: cuanta mayor amplitud del movimiento, mayor velocidad máxima. La dirección y la velocidad no se pueden modificar una vez lanzado el movimiento.
Latencia o tiempo de reacción sacádica	Tiempo entre la aparición de un estímulo y el inicio de la sácada 180-300 ms. En condiciones normales se producen movimientos de menor latencia (80-100 ms) llamados sacádicos exprés. Dependen de un predominio de los mecanismos reflejos de respuesta a estímulos.
Período refractario motor	100-200 ms siguientes al término de una sácada durante los cuales no puede iniciarse voluntariamente un nuevo movimiento sacádico.
Tiempo mínimo de fijación	200-350 ms. Comprende el período refractario motor y un tiempo de procesamiento cognitivo del objeto enfocado (50 ms mínimo). Existe una relación directa entre la fijación y la amplitud de la sácada precedente: la fijación es más larga cuanto mayor ha sido el desplazamiento sacádico anterior.

Nota: adaptado de Gila, L. et al. (2009). Fisiopatología y técnicas de registro de los movimientos oculares. *Anales del sistema sanitario de Navarra*, 32(3), p.11.

En la Tabla 2 se presenta un resumen con los parámetros para la caracterización de los micromovimientos asociados con la fijación visual.

Tabla 2. Parámetros para la caracterización de los micromovimientos asociados con la fijación visual

Derivas o fluctuaciones (drifts)	Irregulares y lentos ($0,1^\circ/s$) centrífugos y de 2-5 minutos de arco de amplitud.
Microsácadas (flicks)	Muy rápidos, amplitud $<1^\circ$, para corregir la posición cuando las derivas han alejado excesivamente la imagen del centro de la fóvea o cuando la fijación en un punto estacionario excede los 300-500 m.
Temblor (trebor)	Oscilaciones de alta frecuencia (30-150 hzt) y muy baja amplitud (24 s) que se superponen a los otros movimientos.

Nota: adaptado de Gila, L. et al. (2009). Fisiopatología y técnicas de registro de los movimientos oculares. *Anales del sistema sanitario de Navarra*, 32(3), p. 11.

d. Restablecimiento de la torsión del ojo. Este movimiento fue descubierto por un grupo de científicos en 2016. Se sincroniza con el parpadeo, ayuda a que el ojo se reajuste después de que se genera una torsión (movimiento que se produce cuando se observa un objeto giratorio) y permite que se establezca la imagen. Ocurre de manera automática cuando parpadeamos (Khazali et al., 2016).

En enfermedades como el párkinson, de Huntington, de Wilson y parálisis supranuclear progresiva, este tipo de movimiento se ve afectado.

Dado que la búsqueda visual es la exploración de un objeto único entre una colección de objetos distractores, mediante el eye tracking, interesa analizar los datos que se obtienen de: a) la dirección de la fijación; b) los movimientos oculares; c) la secuencia que siguen los ojos entre cada fijación y cada movimiento sacádico; d) el tiempo que dura la fijación; e) la revisión exhaustiva; f) la indiferencia selectiva; g) el área de interés; h) las zonas de una escena visual que se percibe con mayor nitidez, e i) gran cantidad de información sobre el mundo externo mediante la visión periférica (Horsley et al., 2013; Leigh y Zee, 2015).