

Capítulo 1

ELEMENTOS DE PERCEPCION VISUAL

En el presente capítulo se tratarán los siguientes temas:

- 1.1 Estructura del ojo humano.
- 1.2 Formación de la imagen en el ojo.
- 1.3 Adaptación al brillo y discriminación.

1.1 Estructura del ojo humano.

La figura 1 presenta una sección por corte transversal del ojo humano.

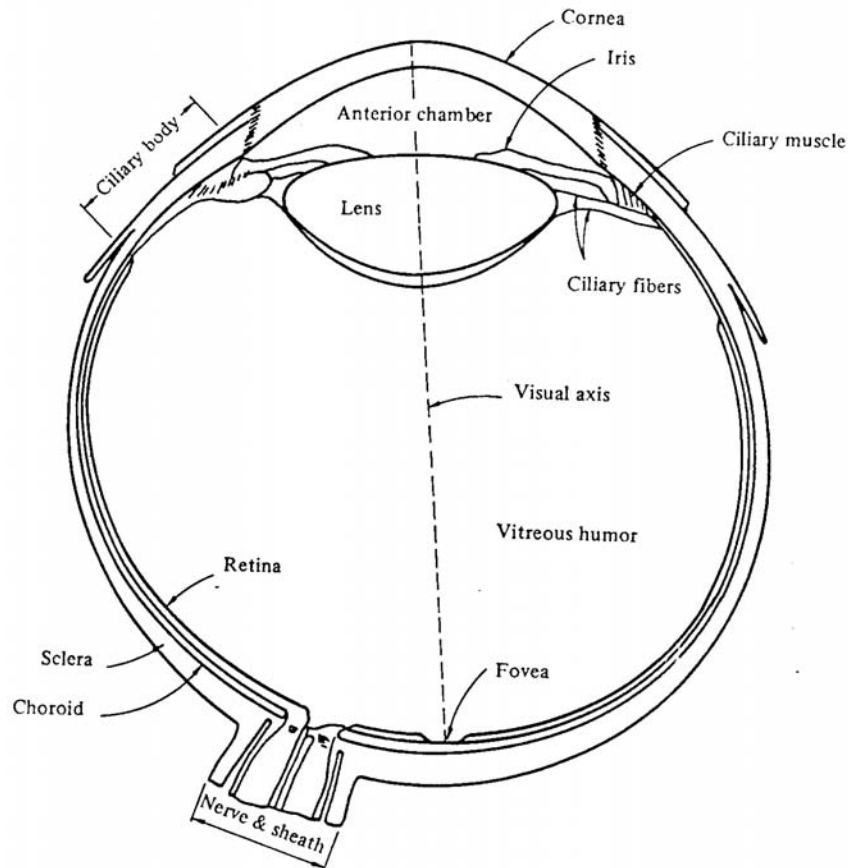


Figura 1: Diagrama simplificado del ojo humano (sección transversal).

El ojo es aproximadamente esférico con un diámetro promedio del orden de 20 [mm]. Está encerrado por tres membranas: la cubierta exterior formada por la córnea y la esclerótica (sclera), la coroides, y la retina. La córnea es un tejido duro y transparente que cubre la superficie anterior. La esclerótica es un tejido continuo con la córnea; es una membrana opaca que cubre el resto del globo ocular.

La coroides se ubica inmediatamente bajo la esclerótica. Esta membrana contiene un tupido circuito de vasos capilares que actúan como la mayor fuente de nutrientes para el ojo. La cubierta coroidal está fuertemente pigmentada ayudando así a prevenir la entrada de luz no controlada y también las reflexiones difusas en el interior del ojo. En su extremo anterior, la coroides se divide en el cuerpo ciliar y en el diafragma o iris; este último se contrae o expande para controlar la cantidad de luz que entra, la contracción se logra por medio de músculos circulares dispuestos en la capa exterior mientras que la expansión la realizan músculos radiales dispuestos en una capa interior.

La abertura central del iris, llamada pupila, varía su diámetro desde unos 2 [mm] hasta unos 8 [mm]. Así como varía la disposición de la pupila, también se observa una diferencia en la pigmentación, la capa exterior contiene pigmentos visibles que dan la coloración, mientras que la capa interior contiene pigmentos negros para otorgarle opacidad.

La membrana más interior del ojo es la retina, la que cubre toda la pared de la parte posterior. Cuando el ojo está bien enfocado, la luz reflejada por un objeto exterior forma su imagen en la retina.

El mecanismo o patrón de la visión está basado en la distribución de receptores de luz discretos sobre la superficie de la retina. Se encuentran dos tipos de receptores: conos y bastoncitos. Los conos totalizan entre 6 y 7 millones, con una fuerte concentración en la región central de la retina llamada fovea, siendo altamente sensitivos al color,

La capacidad de resolución de los detalles finos de una imagen se debe fundamentalmente a que cada uno de estos conos cuenta con su propia terminación nerviosa. Los músculos que controlan el ojo efectúan su giro o rotación hasta que la imagen del objeto de interés se ubica sobre la fovea. La visión por medio de los conos se denomina fotópica o visión de luz brillante.

El número de bastoncitos es mucho mayor que el de conos, alcanzando el orden de 100 millones distribuidos en la superficie de la retina. Su mayor área de distribución y el hecho de estar varios bastoncitos conectados a terminaciones nerviosas comunes reducen el grado de detalle que es posible discernir con estos receptores. Los bastoncitos sirven para dar un cuadro global o general del campo de visión; no participan en la visión del color y son sensitivos a niveles bajos de iluminación. Objetos que – por ejemplo – se ven brillantemente coloreados con luz diurna, al ser observados con luz de luna aparecen como formas incoloras, debido a que sólo los bastoncitos son estimulados. Esta visión se conoce como escotópica o visión de luz tenue.

El lente, formado por capas concéntricas de celdas fibrosas, está suspendido por otras fibras que lo unen al cuerpo ciliar. Contiene entre un 60% a un 70% de agua, alrededor de un 6% de grasa, y más proteínas que cualquier otro tejido del ojo. Este lente está coloreado por una pigmentación ligeramente amarilla, la que aumenta con la edad. Absorbe aproximadamente un 8% del espectro visible, con índices mayores para longitudes de onda menores. Las proteínas absorben significativamente tanto luz ultravioleta como infrarroja, las que – en cantidades excesivas – pueden dañar el ojo (la retina).

1.2 Formación de la imagen en el ojo.

La principal diferencia entre el lente del ojo y un lente óptico convencional es que el primero es flexible. Tal como es posible apreciar en la figura 1, el radio de curvatura de la superficie anterior o frontal del lente es mayor que el radio de la superficie posterior. La forma del lente es controlada por medio de la tensión que aplican las fibras del cuerpo ciliar. Para enfocar objetos distantes los músculos de control provocan un aplanamiento relativo del lente, esto es, ambos radios de curvatura aumentan. Los mismos músculos producen un engrosamiento del lente, disminución de ambos radios de curvatura, para el enfoque de objetos cercanos al ojo.

El envejecimiento atenta contra esta funcionalidad debido a la pérdida de flexibilidad del lente, así como por debilitamiento de los músculos que lo controlan.

La distancia entre el centro focal del lente y la retina varía entre aproximadamente 17[mm] y 14 [mm] según la potencia refractiva aumenta desde su mínimo hasta su máximo. Cuando el ojo enfoca un objeto alejado más de aproximadamente 3 m, el lente presenta su menor poder refractivo; el mayor índice o poder refractivo se produce para el enfoque de objetos cercanos.

Con la información anterior, es fácil calcular el tamaño de la imagen retinal de algún objeto. En la figura 2 se presenta la observación y enfoque de un árbol de 15[m] de altura ubicado a una distancia de 100[m].

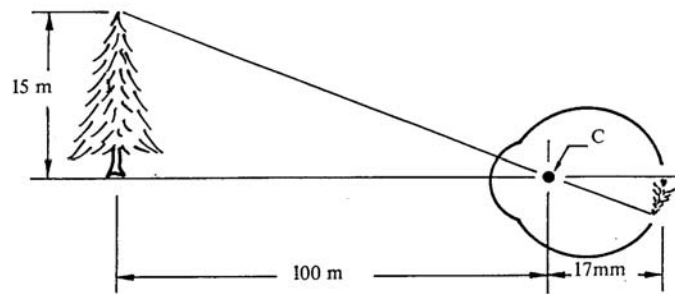


Figura 2: Representación óptica (Punto C: Centro óptico del lente).

La imagen retinal, es fácil determinar, alcanza un tamaño de 2.55 [mm]. Tal como se indicó, esta imagen retinal se refleja o forma en el área de la fovea. La percepción se realiza entonces por la excitación de los receptores (conos o bastones según el nivel de iluminación), los que transforman dicha energía de radiación en impulsos eléctricos que son finalmente decodificados en el cerebro.

1.3 Adaptación al brillo y discriminación.

La capacidad del ojo para discriminar diferentes niveles de brillo es de relevancia para consideraciones relativas a la presentación de imágenes, particularmente cuando éstas correspondan a representaciones digitalizadas, esto es, mediante un conjunto discreto (finito) de niveles.

El rango de niveles de intensidad de luz a los cuales puede adaptarse el ojo humano es enorme, del orden de 10^{10} desde el umbral de percepción escotópica hasta el límite de encandilamiento.

Existe suficiente – o por lo menos considerable – evidencia experimental que indica que el brillo subjetivo (es decir, el brillo percibido por el sistema visual humano) es una función logarítmica de la intensidad luminosa incidente en el ojo. Tal característica se indica en la figura 3 en un gráfico de brillo subjetivo (ordenada) versus intensidad de luz (abcisa, logarítmica).

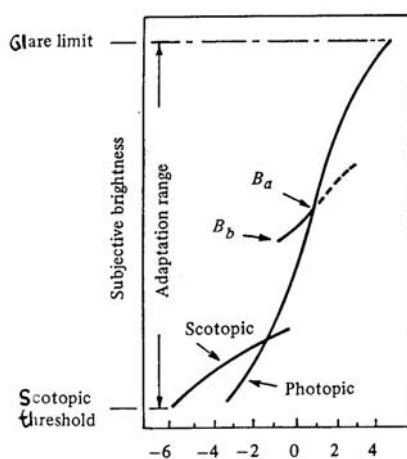


Figura 3: Sensación subjetiva del brillo; nivel de adaptación.

La curva sólida larga indica el rango de intensidades a los cuales puede adaptarse el ojo humano. Considerando sólo la visión fotópica el rango es del orden de 10^6 . La transición desde visión escotópica a fotópica es gradual sobre un rango aproximado desde 0.001 hasta 0.1 [miliambert] (-3 a -1 en la abcisa logarítmica), lo que se refleja por las dos ramas de la curva de adaptación en dicho rango.

Una consideración fundamental o clave para interpretar el impresionante rango que indica la figura 3, radica en el hecho de que el sistema visual no puede operar sobre todo ese rango de manera simultánea. Se logra la operación para tan grandes variaciones mediante cambios en su sensibilidad global, fenómeno conocido como “adaptación al brillo”. El rango total de niveles de intensidad que puede ser discriminado simultáneamente es más bien pequeño en comparación con el rango total de adaptación.

Para algún conjunto dado de condiciones, el nivel presente de sensibilidad del sistema visual se denomina "nivel de adaptación al brillo", el que puede corresponder – por ejemplo – al brillo B_a en la figura 3. La curva corta que intercepta este punto representa el rango de brillo subjetivo que el ojo puede discriminar o percibir cuando se adapta a dicho nivel. Debe notarse que el rango es bastante restringido, con un nivel B_b bajo el cual todo estímulo es percibido como negros indiscriminables. La posición superior (segmentada) no es en sí una restricción, pero si se extiende mucho pierde su sentido, debido a que intensidades tanto mayores elevan el nivel de adaptaciones a niveles mayores que B_a .

La sensibilidad al contraste puede ser medida exponiendo al observador a un campo uniforme de brillo B , con un objetivo circular, de bordes muy bien definidos, en el centro, con brillo $B + \Delta B$, tal como se indica en la figura 4.

Se procede aumentando ΔB desde cero hasta hacerse apenas notorio; la diferencia mínima notable se mide en función de B . La cantidad $\Delta B/B$ se denomina razón de Weber y es aproximadamente constante en alrededor de 0.02 (2%) sobre un amplio rango de niveles de brillo, tal como aparece en la figura 4(b).

Este fenómeno ha dado origen a la idea de que el ojo humano tiene un rango dinámico mucho más amplio que el de aparatos o maquinarias fabricados por el hombre; sin embargo, el procedimiento descrito no corresponde a una situación real o cotidiana de observación, por lo que se obtienen conclusiones de mayor validez si se emplea un procedimiento modificado como se indica en la figura 5.

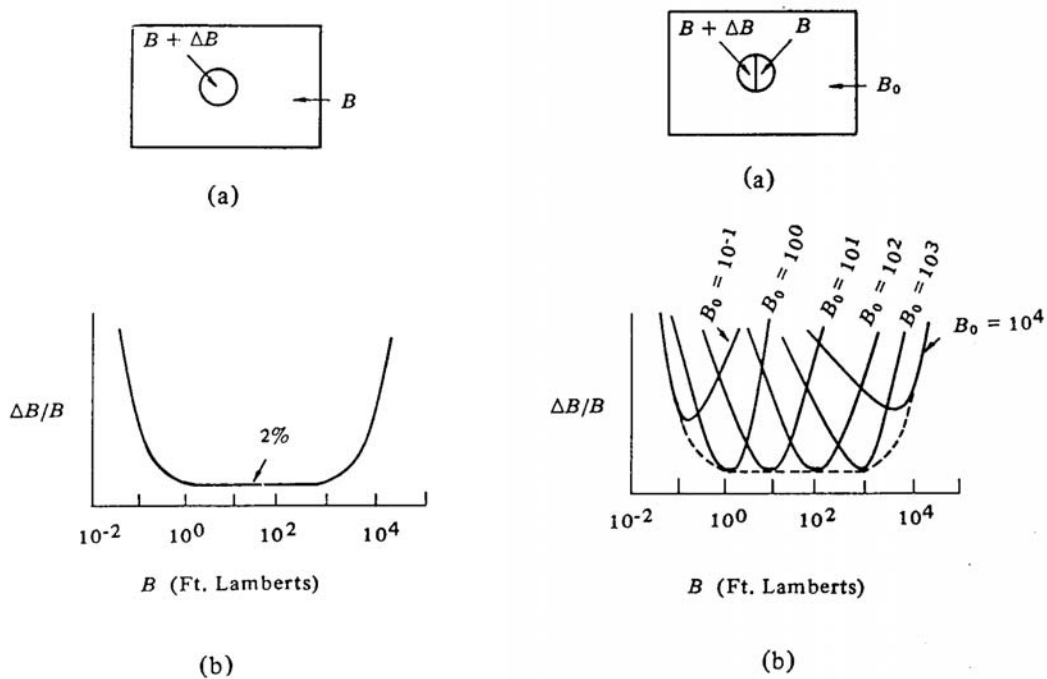


Figura 4: Control o sensibilidad al contraste. con fondo constante
 a) Procedimientos. b) Resultados.

Figura 5: Sensibilidad al contraste con fondo variable.
 a) Procedimientos. b) Resultados.

Tal como en el procedimiento anterior, se mide la razón de Weber, $\Delta B/B$, pero esta vez con el brillo de fondo B_0 (nivel de adaptación) como parámetro. Los resultados típicos obtenidos se indican en la figura 5(b).

El rango dinámico es de alrededor de 2.2 (unidades logarítmicas) centrado alrededor del nivel de adaptación, lo que es comparable o del orden de lo que es posible lograr con aparatos electrónicos correctamente ajustados con el brillo de fondo.

Más que el rango dinámico, la característica destacable del ojo es la rapidez con que se adapta, diferentemente en distintas zonas de la retina.

El significado de un rango dinámico de 2.2[log-units] es que $\Delta B/B$ permanece relativamente constante en dicho rango.

A medida que B se hace cada vez más diferente del nivel de adaptación B_0 , su apariencia también cambia. Así, un brillo de alrededor de 1.5[log-units] por sobre o por bajo B_0 lo hacen aparecer como blanco o como negro, respectivamente. Si el objetivo central es mantenido a nivel constante mientras B_0 se varía en un rango amplio, el objetivo parece cambiar desde completamente blanco hasta completamente negro.

En el caso (real) de una imagen compleja, el sistema visual no se adapta a un único nivel de brillo, sino a un nivel promedio que depende de las características de la imagen. A medida que el ojo recorre la escena, el nivel de adaptación fluctúa alrededor de dicho promedio. Para un punto o área pequeña en la imagen, la razón de Weber es generalmente mucho mayor a la obtenida en un procedimiento experimental, debido principalmente a la falta de contornos abruptos o definidos y a las variaciones de intensidad del fondo. El resultado es que el ojo puede discriminar alrededor de 20 ó 30 niveles de intensidad en un punto de una imagen compleja.

Lo anterior no significa que se requiera sólo tan reducido número de niveles como capacidad mínima en un sistema de reproducción de imágenes para obtener resultados visualmente satisfactorios.

El estrecho rango de discriminación "sigue" al nivel de adaptación a medida que éste varía para acomodarse a los diferentes niveles de intensidad según el ojo recorre la escena. Esto permite un mucho mayor de discriminación global de intensidad.

Para obtener dispositivos de visualización o despliegue de imágenes (displays) que resulten razonablemente "suaves" al ojo para una amplia variedad de tipos de imágenes, se requiere un rango normalmente bien por sobre los 100 niveles de intensidad. Esta consideración será relevante en la discretización requerida en imágenes digitales.

El brillo de una zona o sector, según lo percibe el ojo, depende de otros factores además de la luz radiada desde dicha zona. En lo que es relevante para aplicaciones de procesamiento de imágenes, uno de los fenómenos más interesantes respecto a la percepción de brillo, es que el sistema visual humano tiende a entregar una sobrerrespuesta (overshoot) en torno a los límites entre regiones de diferentes intensidades. El resultado de esta sobrerrespuesta es que áreas de intensidad constante aparecen como si tuvieran brillo variante, en las cercanías de la zona vecina. La figura 6 intenta graficar lo descrito.

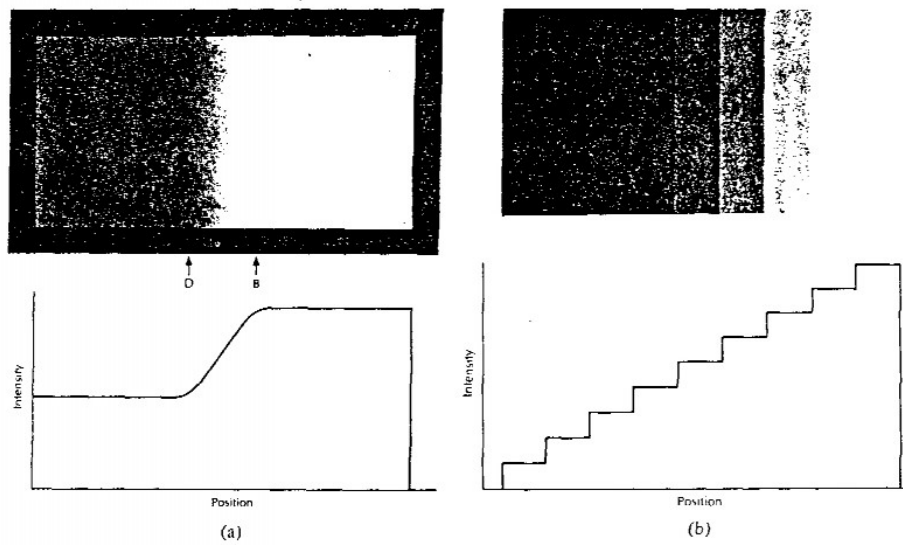


Figura 6: Efecto bandas de Mach.

Las imágenes de la figura 6 están formadas por intensidades de acuerdo a los perfiles bajo cada una de ellas. En la figura (a), aunque la variación de la intensidad corresponde a una curva suave, siempre creciente, el ojo percibe una zona más clara – marcada B – y una más oscura –marcada D- ; estas franjas reciben el nombre de “bandas de Mach”.

Un efecto aún más apreciable se observa en la figura (b); tal como lo indica el perfil, las franjas tienen intensidad constante, sin embargo, el patrón de brillo percibido parece fuertemente variado entre uno y otro límite de la banda.