

TEMA III

LA CALIDAD DE LA IMAGEN: AGUDEZA VISUAL

- I - Punto de fijación, línea de mirada y ejes del ojo**
- II - Distribución de fotorreceptores en la retina**
- III - El Campo visual**
- IV - Las aberraciones en el ojo**
- V - La agudeza visual como medida de la calidad óptica del ojo**
 - V.1 - El límite de la visión espacial**
 - V.2 - Definiciones de Agudeza Visual**
 - V.3 - Tareas de agudeza visual y optotipos**
- VI - Factores que afectan a la medida de la agudeza visual**
 - VI.1. - Factores del estímulo**
 - IV.1.1. - Luminancia**
 - IV.1.2. - Contraste**
 - IV.1.3. - Tiempo de exposición**
 - IV.1.4. - Composición espectral de la luz**
 - VI.2. - Factores ópticos**
 - IV.2.1. - Desenfoque**
 - IV.2.2. - Pupila (Difracción)**
 - IV.2.3. - Acomodación**
 - VI.3. - Factores neurales**
 - IV.3.1. - Mosaico de receptores**
 - IV.3.2.- Adaptación**
 - IV.3.3. - Localización retineana**
 - VI.4. - Otros factores**

I - Punto de fijación, línea de mirada y ejes del ojo

En la zona central de la retina existe una depresión llamada **fóvea** con un radio aproximado de 0'75 mm. La zona central con sólo 0'3 mm de diámetro se denomina **foveola** y en el centro de la misma, se forma la imagen del punto de fijación, alrededor del cual se ordenan los demás objetos del campo visual. **El punto de fijación** está bien definido siempre pues, aunque no se pueda separar anatómicamente dos conos para definir el conjugado de dicho punto, siempre que dos puntos sean separables se sabe perfectamente cuál de ellos se está utilizando como punto de fijación.

Helmholtz demostró que el punto de fijación no está sobre el eje óptico del ojo, de ahí que sea necesario introducir otros ejes además del óptico.

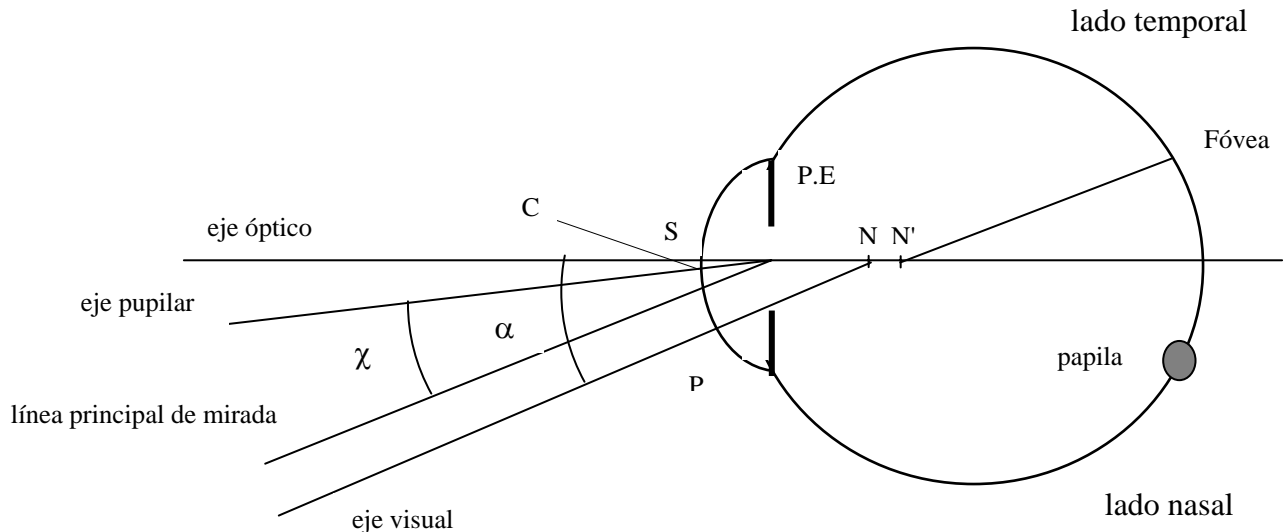


Figura 1.- Esquema de los ejes del ojo. El punto nodal objeto N coincide prácticamente con el centro de curvatura de la córnea. S: vértice corneal. C: centro de la zona óptica. P: polo oftalmométrico.

El eje óptico: ya se dijo en el tema anterior que los centros de curvatura de las superficies de la córnea y el cristalino no están alineados por lo que es difícil definir el

eje óptico del ojo. Sin embargo, los puntos principales de la córnea y del cristalino coinciden bastante bien sobre una línea, de modo que se puede representar bien el eje óptico del ojo por una línea que se ajuste lo mejor posible a esos cuatro puntos.

El eje visual: Es la semirrecta, en el espacio objeto, que une el punto nodal N con el punto de fijación. Es paralela a la semirrecta, en el espacio imagen, que une el punto nodal N' con el centro de la fovea.

Como N está muy cerca del centro de curvatura de la córnea el eje visual es casi perpendicular a la córnea. El punto P de corte con la córnea se llama polo oftalmométrico y es el que se utiliza para medir los radios de curvatura. En efecto, el radio de curvatura, r, de la cara anterior de la córnea aumenta cuando nos separamos del polo o vértice (la córnea se aplana). El polo es un punto demasiado vago ya que el eje geométrico del ojo es ficticio. Gullstrand propuso tomar como origen el polo oftalmométrico (para medir con los oftalmómetros) que será el punto de la córnea donde se centran las imágenes por reflexión.

Como el eje óptico no pasa por la fovea sino que está desviado respecto de ésta hacia el lado nasal en la retina, llamaremos α al ángulo que forman entre sí ambos ejes. En sujetos adultos α varía entre 4° y 8° , el valor medio sería de 5° . Es mayor para el hipermetrope (10°) y menor para el miope (incluso negativo).

La distancia entre el vértice de la córnea S y el polo oftalmométrico P es:

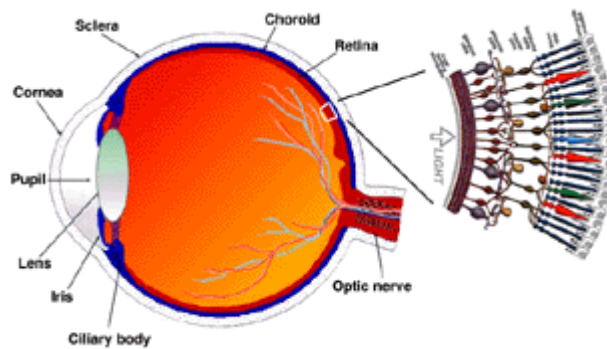
$$SP = SN \cdot \text{sen } \alpha = 7'2 \cdot \text{sen } 5^\circ = 0'63 \text{ mm}$$

Línea de mirada principal: la semirecta en el espacio objeto que une el punto objeto con el centro de la pupila de entrada (PE) es la línea de mirada. Cuando el punto objeto es el punto de fijación se trata entonces de la línea de mirada principal. La ventaja de esta línea, frente al eje visual, es que pasa por un punto concreto del ojo, en lugar de pasar por el punto nodal objeto, de dudosa existencia, ya que se trata de un ente paraxial.

Eje pupilar: Es la línea normal a la córnea pasando por el centro de la PE. Su intersección con la córnea es el centro C de la zona óptica. Se llama χ al ángulo entre el eje pupilar y la línea de mirada, suele ser ligeramente menor que α pero la diferencia es despreciable y, en la práctica, se mide χ .

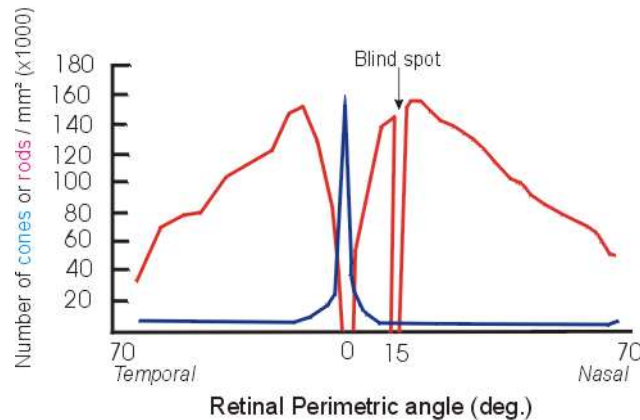
II - Distribución de fotorreceptores en la retina

Es sabido que existen básicamente dos tipos de fotorreceptores en la retina: los conos y los bastones. Cada uno de ellos presenta características estructurales y de funcionamiento diferentes a las del otro, esto hace que existan en la retina zonas especializadas en ciertas tareas o que presentan determinado tipo de respuestas según en ellas predominen los conos o los bastones.



Los conos abundan en la fovea y son escasos en la periferia (Figura 2). Son de menor diámetro que los bastones de ahí que proporcionen en esa zona central de la retina una buena visión de detalles espaciales. En la foveola es donde su concentración es mayor y su diámetro más fino (1'5 micrometros) por ello es la región retiniana de mayor agudeza visual. Los conos responden en condiciones de visión diurna y son

sensibles al color, ya que existen tres clases de conos con diferentes curvas de sensibilidad espectral, cuyos máximos de sensibilidad corresponden a los colores rojo, verde y azul (Figura 3).



Adapted after Østerberg, 1935

Figura 2.- Distribución de fotorreceptores

Los bastones presentan una mayor sensibilidad a la luz y responden en condiciones de visión nocturna. En el centro de la retina hay una zona de 0'5 a 0'6 mm de diámetro (aproximadamente 1°) que está libre de bastones. Éstos están distribuidos por la extrafóvea, encontrándose la máxima concentración a 20° del centro de la fóvea (Figura 2). Los bastones son ciegos al color, y debido a su mayor diámetro proporcionan una agudeza visual baja.

La distribución de fotorreceptores en la retina da lugar, como se ha dicho anteriormente, a las distintas características que presenta la visión central (o foveal) respecto a la visión periférica (o extrafoveal). La Visión central se caracteriza por una buena Agudeza Visual (visión de pequeños detalles espaciales) baja sensibilidad a la luz y por tener visión de colores. La visión periférica, por el contrario, presenta una mayor

sensibilidad a la luz, una baja agudeza visual y una ausencia de visión de colores; siendo en cambio muy sensible al parpadeo y al movimiento.

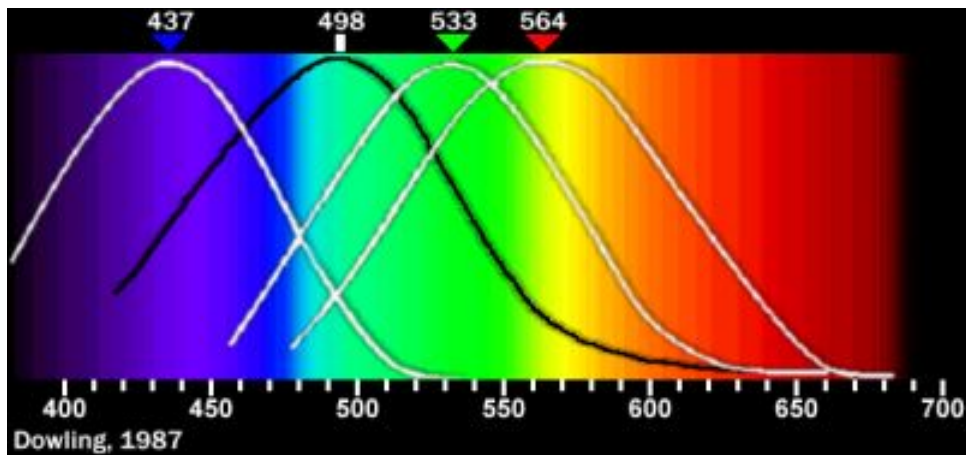


Figura 3.- Sensibilidad de conos y bastones

III - El Campo visual

Si consideramos el ojo en una posición fija, mirando al frente, el campo visual se extiende 60° en la dirección superior, 75° en la inferior, 60° del lado nasal y 100° del lado temporal. Estos valores son aproximados y varían de unos individuos a otros dependiendo de su anatomía facial (nariz, cejas, etc...). Se puede determinar experimentalmente la extensión del campo visual del ojo simplemente situando al sujeto en la oscuridad y desplazando una luz de fijación (una luz roja puntual) que esté a más de un metro de distancia por delante del sujeto, hasta delimitar el punto en que deja de verla. Al campo objeto que acabamos de describir le corresponde como campo imagen el área sensible de la retina. En ésta conviene destacar dos zonas: la fovea y la púpila o disco óptico.

En la parte central de la *fovea*, llamada *foveola* se forma la imagen del punto de fijación. Esta zona subtiende aproximadamente 1° desde el punto nodal. La *púpila* es la zona donde el nervio óptico sale de la retina, se la conoce como punto ciego, ya que en ella

no hay fotorreceptores. Ocupa un área de 5° en dirección horizontal y 7° en la dirección vertical, siendo 15° la separación entre el centro de la fovea y el de la púpila.

IV - Las aberraciones en el ojo

Si nos limitamos a la visión foveal, lo que equivale a reducir el campo de visión a 1° , y además consideramos visión diurna (con púpila menor de 3mm) estaríamos prácticamente en condiciones paraxiales. Sólo tendríamos que preocuparnos de la aberración cromática y de un pequeño desenfoque debido a la aberración esférica residual por el tamaño de la púpila.

Aberración cromática: Dado que todos los medios son dispersivos, excepto el vacío, esta aberración es inevitable. Se pone de manifiesto cuando utilizamos luces monocromáticas, siendo posible medir la cantidad de aberración del ojo para cada uno de los colores. Así se sabe que el ojo con longitudes de onda cortas (luz azul) resulta miope de -1 dioptría e hipermetrope de +0'5 dioptrías para las largas longitudes de onda (luz roja), siendo emétrope aproximadamente para las longitudes de onda medias (colores verde-amarillo). Cuando utilizamos luz blanca, considerando la sensibilidad espectral del ojo y el efecto de la mácula, las consecuencias de esta aberración quedan reducidas. No obstante, para determinadas experiencias en que se requiera mucha precisión habrá que compensar el efecto de esta aberración.

Aberración esférica: El efecto de esta aberración consiste, como sabemos, en que la imagen de un punto es un círculo de desenfoque. Cuanto mayor es el tamaño de la púpila mayor es el desenfoque en la imagen lo cual resta resolución (agudeza visual) al sistema. Esta aberración comienza a afectar en visión foveal para valores del diámetro pupilar superiores a 2'5 mm.

Astigmatismo por incidencia oblicua, coma, curvatura de campo y distorsión:

Estas aberraciones, cuando la abertura tiene un valor pequeño y permanece constante, comienzan a tener importancia cuando se extiende el campo de visión, de modo que su valor aumenta con el valor del campo. En visión foveal (campo central de 1°) su efecto de estas aberraciones es mínimo y por ello, no afectan al buen nivel de agudeza visual que se consigue en la fovea.

En visión extrafoveal o periférica, su efecto se hace cada vez mayor a medida que nos separamos del centro de la retina. Sin embargo, debido al bajo valor de la sensibilidad espacial (baja AV) en esa zona de la retina, no resultan perjudiciales los efectos de desenfoque. En segundo curso se estudiarán con más detalle las propiedades de la visión humana, pero recordemos aquí que la visión extrafoveal es una visión de bajas frecuencias espaciales (visión "de bulto", en lenguaje ordinario) y que cuando deseamos ver con detalle algún objeto periférico que atrae nuestra atención volvemos la cabeza y lo enfocamos en la fovea, única zona de nuestro campo visual donde es posible una calidad de imagen suficientemente alta. La aberración de curvatura de campo, no afecta de forma importante debido a la curvatura del plano imagen y a la costumbre del ojo a la curvatura de la bóveda celeste.

V - La agudeza visual como medida de la calidad óptica del ojo

V.1 - El límite de la visión espacial

La existencia de un límite en la *visión espacial*, y la dependencia de éste de múltiples factores, es un hecho cotidiano y bastante conocido. Imaginemos que vemos un cartel fijo sobre una pared. Supongamos que la cabecera del cartel es una frase escrita con letras grandes y que le siguen distintos párrafos escritos sucesivamente con letra cada vez más pequeña. Si de lejos hemos leído la primera frase y nos ha interesado, nos acercaremos para leer los párrafos siguientes ya que de lejos hemos conseguido

detectarlos pero no éramos capaces de leerlos. Cuanto más pequeñas sean las letras más cerca tendremos que situarnos para poderlas leer; y lo mismo ocurriría si en lugar de leer pretendiésemos distinguir pequeños detalles de un dibujo. Este método de reducir la distancia de visión para conseguir ver detalles cada vez más pequeños, es evidente que alcanza su límite cuando la distancia coincide con el punto próximo del ojo. Acercándonos más solo conseguiríamos empeorar la visión al aumentar el "desenfoque".

Puede deducirse de lo anterior que el límite de la visión espacial estará íntimamente relacionado con el tamaño del detalle más pequeño que un observador es capaz de detectar o reconocer. Sin embargo, si pensamos en diseñar un experimento encaminado a determinarlo, inmediatamente surgirán varias cuestiones, unas relativas al estímulo a utilizar: forma, tamaño, anchura de los trazos, contraste respecto del fondo..., otras a las condiciones de observación: distancia, iluminación, pupila..., y otras relativas a la tarea que se asignará al sujeto en la experiencia pues, como ejemplo, hemos visto que existe mucha diferencia entre detectar y reconocer (entre saber que hay unas letras y saber qué letras son). Es lógico suponer que el resultado obtenido dependerá de algunos de estos factores, y quizá también de otros.

En definitiva, lo que se pretende determinar es **el umbral para la visión de detalles espaciales**, conocer el método de medirlo y el modo de expresarlo numéricamente. La inversa del valor umbral, como ocurre con todos los umbrales, será una medida de la capacidad (o sensibilidad) del sistema para desempeñar distintas tareas dentro de la visión espacial: detectar, reconocer o resolver detalles espaciales. La tarea que se asigna al sujeto determinará el que influyan más unos factores u otros en el límite de la visión espacial.

V.2 - Definiciones de Agudeza Visual

La agudeza visual es una medida de la capacidad del sistema visual para detectar, reconocer o resolver detalles espaciales, en un test de alto contraste y con un buen nivel de iluminación. Tener una buena agudeza visual, significa que el sujeto es capaz de apreciar pequeños detalles de una imagen, mientras que una mala agudeza visual implica que el sujeto aprecia solamente gruesos rasgos en la imagen.

Para establecer la agudeza visual, se le presentan al observador, a una distancia fija, varios tests de alto contraste con distintos tamaños. El tamaño del test más pequeño (o bien, determinado detalle de un test) que el observador es capaz de detectar, o reconocer (depende de la tarea asignada al sujeto) se toma como valor umbral, y se suele expresar en minutos de arco. Expresar el tamaño del objeto por el valor del ángulo visual u , en lugar de dar el tamaño lineal, y , tiene la ventaja de que el umbral resulta independiente de la distancia.

Existen diferentes formas de expresar la agudeza visual, a continuación trataremos de cada una de ellas.

Agudeza decimal: Es la inversa del ángulo u expresado en minutos

$$V = 1 / u \text{ (min.)} \quad (1)$$

Se le llama así por ser su valor un número decimal. Valdrá la unidad cuando $u = 1$ minuto. El valor $V = 1$ se toma como valor normal de la agudeza visual en esta notación decimal. Cuanto menor sea el detalle que es capaz de apreciar el sujeto, mayor será el valor de su agudeza visual.

En la práctica los tests se diseñan de manera que el menor detalle es $1/5$ de su tamaño. Por esta razón a veces se define la agudeza decimal como $V = 5/u$ donde u representa aquí el tamaño del test más pequeño detectado, y no el detalle más pequeño que sería 5 veces menor.

Logaritmo MAR: En esta escala, la agudeza es el logaritmo del tamaño angular, en minutos de arco, del detalle más pequeño reconocido por el sujeto. (Véase carta de letras en la Figura 3.). La notación es:

$$V = \log \text{MAR} \quad (2)$$

donde MAR significa mínimo ángulo de resolución. Con esta notación, el detalle que subtende un minuto daría lugar a una agudeza $\log \text{MAR} = 0$ y el detalle que subtende 10 minutos de arco daría $\log \text{MAR}$.



Agudeza Snellen: La agudeza también puede expresarse por la fracción de Snellen.

$$v = a / a_0 \quad (3)$$

donde a es una distancia standard a la que se coloca la carta conteniendo los tests de tamaño progresivamente decreciente y a_0 es la distancia a la cual el test más pequeño reconocido por el sujeto a la distancia standard subtendería $u = 1$ minuto.

De la Figura 4, es fácil comprobar que esta definición es equivalente a la agudeza decimal si se hace la aproximación de sustituir los ángulos por las tangentes.

En efecto:

$$v = a / a_0 = (y/tg u) / (y/tg 1') = tg 1'/tgu = 1/u = V \quad (4)$$

Existen cartas calibradas para diferentes distancias; las más comunes son para 20 pies, 6 metros y 4 metros para agudeza de lejos y 40 centímetros para agudeza de cerca. Para estas distancias la agudeza unidad se expresaría como: 20/20, 6/6, 4/4 y 40/40 respectivamente. Así, con una carta calibrada a 20 pies, un sujeto que tuviese una agudeza de 20/25 vería bien a 20 pies un test que subtendiera 1 minuto a 25 pies, situación representada en la Figura 4.

Tamaño de la imagen retineana: El valor de la agudeza también puede expresarse por el tamaño, y' , de la imagen retineana correspondiente al detalle más pequeño percibido, que subtiende un ángulo u . Conocido u , es inmediato el cálculo del tamaño de la imagen retineana y' a través de relaciones ya conocidas de la óptica geométrica. En efecto,

$$y' = u / P \quad (5)$$

donde P es la potencia del ojo (60 D). Si expresamos el ángulo u en minutos se tiene:

$$y' = 4.85 u \quad (6)$$

con y' expresado en micras.

V.3 - Tareas de agudeza visual y optotipos

El concepto de agudeza visual y su medida en cualquiera de las tres formas que acabamos de describir es algo ya establecido y sobre lo que existe un general acuerdo. Sin embargo, hay bastante disparidad en cuanto al tipo de test objeto utilizado para determinar la agudeza visual al que se suele denominar optotipo. Históricamente, el uso de diferentes optotipos fué surgiendo de las distintas aplicaciones

a las que el experimentador deseaba dirigir su medida de la agudeza; es decir que del planteamiento u orientación que se da a la experiencia dependerá la tarea que se asigne al observador y la elección del optotipo adecuado. Así, por ejemplo, para la astronomía era interesante averiguar la separación mínima entre dos estrellas para que un observador las percibiera separadas, (*minimum separable*); en otros estudios se buscaba en cambio el mínimo tamaño necesario para decidir si un objeto está o no en el campo visual y, también podemos encontrar experiencias cuyo objetivo era determinar el mínimo tamaño de un objeto para ser reconocido. Este último caso se correspondería con el uso del conocido optotipo de letras.

Las distintas tareas que se pueden aplicar a un observador para determinar su agudeza visual las podemos resumir en: a) *detección*: consiste simplemente en decir si el optotipo está o no presente en el campo visual, se trata del problema del *minimum visible*; para estas medidas suelen utilizarse dos clases de optotipos: objeto luminoso sobre fondo oscuro (estrellas) donde interviene tanto el mínimo tamaño del objeto como la mínima cantidad de luz, y objeto oscuro sobre fondo luminoso (caso del alambre fino) b) *reconocimiento*: el observador tiene que nombrar el test objeto, o bien especificar alguna de sus características (p.e. su orientación), los optotipos más utilizados en esta tarea son el anillo de Landolt y las letras de Snellen, como ejemplo vemos en la Figura 3 algunas cartas. c) *resolución*: el observador tiene que percibir una separación entre elementos del optotipo. La Figura 5 muestra los optotipos utilizados para esta tarea.

VI - Factores que afectan a la medida de la agudeza visual

Cuando nos planteamos la medida de la agudeza visual de un sujeto, existe un buen número de parámetros que es necesario conocer (o fijar) de antemano, pues del valor que éstos tengan (o les asignemos) depende, a veces mucho, el resultado de la agudeza medida. Por esta razón es importante analizar por separado el efecto sobre la agudeza, de cada uno de los principales factores que pueden llegar a convertirse en el factor determinante de su valor.

Para ordenar de alguna manera este conjunto de factores los agrupamos en cuatro grupos o categorías siguiendo el criterio que explicamos a continuación. En el primer grupo incluiremos aquellos factores que constituyen una característica del estímulo que se utiliza: nivel de luminancia, contraste, duración del estímulo o tiempo de exposición y distribución espectral de la luz (color). El segundo grupo lo forman lo que podríamos denominar factores ópticos ya que son característicos de la parte óptica del sistema visual: desenfoque, pupila y estado de acomodación. El tercero sería el grupo de factores neurales: mosaico de receptores, estado de adaptación y, localización del estímulo o extrafovealidad. Por último trataremos brevemente de otros factores, como la edad del sujeto y otros de tipo subjetivo.

IV.1. Factores del estímulo

En general, ya se ha comentado que la elección de tarea y optotipo es un codicionante fundamental en las medidas de agudeza. Cada factor de los que vamos a analizar puede tener un efecto diferente sobre los distintos optotipos o tareas. Por ello, antes de comenzar este análisis de factores podríamos preguntarnos con cuál de los optotipos más clásicos se obtiene una mejor medida de la agudeza visual, es decir podríamos tratar de establecer una comparación entre los valores de la agudeza que se obtienen con los distintos optotipos. Sin embargo esta pregunta no tiene una respuesta simple, como ya podíamos suponer, precisamente por la gran variedad de situaciones que pueden presentarse según los valores que tomen los distintos parámetros en cada experiencia. A modo de ejemplo, se puede afirmar, que el anillo de Landolt da una

agudeza más alta que la mira de Foucault cuando la medida de la agudeza se lleva a cabo con un nivel fotópico de luminancia superior a 10 cd/m^2 . Pero con otras luminancias la situación podría invertirse y la afirmación anterior resultar falsa. En efecto, con luminancias débiles, acercándonos hacia el umbral absoluto, la agudeza obtenida con mira de Foucault es mayor que la que proporciona el anillo de Landolt, que a su vez es mayor que la agudeza medida con la letra E de Snellen.

IV.1.1.Luminancia

En la vida ordinaria, hemos podido comprobar en multitud de ocasiones que somos capaces de llegar a reconocer o diferenciar objetos pequeños aumentando el nivel de iluminación. Por tanto, es un hecho cotidiano y bien conocido que con un determinado optotipo la agudeza visual mejora cuando aumenta la luminancia del test. La gráfica de la Figura 5 presenta la forma clásica de la variación de la agudeza con la luminancia del test. En este caso particular se trataba de una tarea de reconocimiento en la cual el optotipo era la U de Snellen de la cual el sujeto tenía que especificar la orientación (abertura arriba, abajo, derecha o izquierda). En la curva se aprecian claramente dos tramos bien diferenciados, que se pueden asimilar a dos rectas de mayor y menor pendiente, las cuales corresponderá a la visión fotópica y a la visión escotópica respectivamente. Obsérvese que ambas rectas se cortan alrededor del punto $V = 0.16$, $L = 5 \cdot 10^{-2} \text{ cd/m}^2$. En visión fotópica, entre 10^{-1} y 10^2 cd/m^2 se aprecia un fuerte crecimiento de la agudeza, lineal con el logaritmo de la luminancia. A partir de 10^2 cd/m^2 el crecimiento de V con L ya es muy lento de modo que la agudeza tiende a alcanzar un valor asintótico a partir de una cierta luminancia. En cuanto a la visión escotópica, conviene recordar que la miopía nocturna afecta a la medida de la agudeza visual con luminancias muy bajas. Por lo tanto ese tramo de la curva variará según se corrija o no el efecto de la miopía nocturna (ver más adelante el efecto del factor desenfoque). Si se desea corregir su efecto es necesario considerar que la miopía nocturna aumenta de valor a medida que la luminancia disminuye. Según los datos que

se han divulgado se acepta una miopía de -1 dioptría a 10^{-2} cd/m² y de -2 dioptrías hacia $3 \cdot 10^{-5}$ cd/m². Con sujetos que poseen sólo la visión de bastones, se ha comprobado midiendo la variación de la agudeza con la luminancia, que la curva que se obtiene es la escotópica y que se prolonga al aumentar la luminancia y tiene un valor asintótico en $V = 0.20$ aproximadamente. En la Figura 6 se comparan los resultados de la tarea de reconocimiento (anillo de Landolt) con los de resolución (red o mira de Foucault). Tal como habíamos señalado anteriormente al comparar ambos optotipos, aquí se observa que ambas curvas se cruzan alrededor de 10 cd/m².

En la definición de agudeza visual se explicita que es una magnitud relativa a tests de alto contraste y con un buen nivel de iluminación. Lo cual es coherente con el concepto de agudeza como el límite máximo de la visión espacial, ya que eso implica que la medida se realice en las condiciones más favorables (máxima visión). La luminancia standard recomendada para medidas de agudeza es 85 cd/m².

IV.1.2. Contraste

Por lo dicho en el párrafo anterior, no tiene mucho sentido hablar de agudeza con baja luminancia o bajo contraste; sin embargo, conocer como varía el valor de la agudeza al disminuir el contraste o la luminancia, sí aporta datos muy interesantes que ayudan a comprender el comportamiento del sistema visual. Cuando se mide la agudeza de un observador sea para aplicaciones clínicas o de otro tipo, se utilizan optotipos de trazos negros sobre fondo blanco, de modo que presentan un contraste alrededor de 0.95 (en la práctica es casi imposible alcanzar el contraste unidad). La iluminación ambiente puede actuar de velo reduciendo el contraste. En cualquier caso, hay que cuidar que el contraste del optotipo nunca esté por debajo del valor 0.85.

Al tratar sobre la tarea de detección ya se dijo que éste es un problema que puede ser abordado desde el punto de vista de los umbrales de discriminación de luminancia, ya que en realidad se trata de que exista una disminución en la iluminación retineana que se pueda percibir (caso del fondo blanco y punto oscuro, por ejemplo).

Considérese que aunque el contraste entre el test y el fondo sea de 0.95, en la retina el contraste será menor teniendo en cuenta los efectos de la difracción, las aberraciones y la difusión de la luz.. Por esta razón, cuando se determina la agudeza haciendo variar el contraste entre el test y el fondo, tenemos una situación en la que se solapan dos características distintas del sistema visual: la agudeza visual y la discriminación (o umbral diferencial) de luminancia.

En la detección de líneas finas al variar el contraste, se encuentra que una línea fina que tiene un alto contraste con respecto al fondo y una línea más ancha de menor contraste se detectan con la misma facilidad siempre que el contraste sea el mismo en sus imágenes retineanas. Sin embargo, en la detección de pequeños círculos la detección no depende de una igualdad en el contraste respecto del fondo sino de una igualdad en la variación total del flujo de luz que alcanza la retina, o en otras palabras, del producto del contraste por el área. Así un círculo pequeño de alto contraste respecto del fondo se detecta con la misma facilidad que un círculo más grande de menor contraste, siempre que la diferencia total en el flujo sobre la retina sea el mismo para las dos imágenes retineanas, aunque es sabido que la imagen retineana del círculo pequeño, tiene contraste más alto que la de un disco mayor de la misma detectabilidad. Lo que acabamos de afirmar sobre la detectabilidad de círculos, tiene su equivalencia en una afirmación que se hizo al hablar de umbrales diferenciales: La fracción de Weber ($\Delta L / L$) es inversamente proporcional al área del test, siempre y cuando dicha área (circular o no) sea suficientemente pequeña como para que estemos en la zona de sumación total. Usando test rectangulares, se ha comprobado que se cumple la reciprocidad entre el área del test y $\Delta L / L$ mientras que el largo y el ancho del test sean inferiores a 2 minutos de ángulo subtendido. Cuando las dimensiones del test son mayores se ha demostrado que la detección depende del perímetro del test y no de su área.

El problema es mucho más complejo cuando se trata de las tareas de resolución y de reconocimiento. No obstante, puede afirmarse que en general la agudeza visual disminuye con el contraste, con una dependencia aproximadamente lineal con $\log C$ o

con $C^{1/2}$. En la Figura 7 se muestran los resultados obtenidos por Legge et al. (1987) usando como test la E de Snellen.

IV. 1.3. Tiempo de exposición

El tiempo de exposición no es un factor influyente en las medidas de agudeza que se llevan a cabo con fines prácticos, ya que en esos casos el tiempo de exposición es ilimitado. Si antes hemos hablado de unos valores standard (o niveles recomendables) de luminancia y contraste para medir la agudeza de un sujeto, ahora tendríamos que añadir a esas condiciones standard que el tiempo de exposición sea ilimitado. Aunque, por consiguiente, desde el punto de vista práctico éste no es un parámetro muy relevante, su estudio tiene sin embargo un gran interés teórico.

En cuanto a la tarea de detección, por su similitud con la determinación del umbral absoluto, podemos esperar para exposiciones cortas una proporcionalidad inversa entre luminancia y tiempo como se vió en el Capítulo 5. Cuando se determina la agudeza visual en condiciones standard, se encuentra una proporcionalidad inversa entre el tiempo y el área del estímulo; es decir, la detectabilidad depende de la cantidad total de luz. Considerando un test circular, si el tiempo es inversamente proporcional al área, la agudeza será directamente proporcional a la raíz cuadrada del tiempo. En efecto si,

$$S \cdot t = k \quad (8)$$

siendo S el área, t, el tiempo de exposición y k una constante, se tiene:

$$t = k/\pi(y/2)^2 = 4k/\pi a^2 \cdot u^2(\text{rad}) = 4k (3438)^2/\pi a^2 u^2(\text{min.}) = 1/k'2 u^2(\text{min.}) = V/k'2$$

ya que $u(\text{rad.}) = y/a = u(\text{min.}) / 3438$. Por tanto se tiene que:

$$V = k' t^{1/2} \quad (9)$$

donde: $k' = \pi a^2/4k(3438)^2$, relación que se cumple con altos niveles de luminancia y pequeños tiempos de exposición.

En la tarea de resolución cuando la luminancia es alta (de 100 cd/m² en adelante) también la influencia del tiempo de exposición es importante pero sólo con tiempos inferiores a 0.1 segundos aproximadamente. Con tiempos mayores la influencia se va haciendo despreciable. Sin embargo, con luminancias menores Graham y Cook (1937) muestran, utilizando redes, que la relación entre la agudeza visual y el logaritmo del tiempo de exposición es una sigmoide. Es decir, tanto para tiempos muy bajos como muy altos, la agudeza tendería a un valor asintótico, teniendo lugar la variación significativa de la agudeza con el tiempo de exposición en el intervalo entre 0.1 y 1 segundos aproximadamente.

IV.1.4. Composición espectral de la luz

La agudeza visual es la misma con luz blanca que con luz coloreada de cualquier longitud de onda según los resultados de numerosos autores (Macé de Lépinay y Nicati, 1881 y 1883; König, 1897; Arnulf y Flamant, 1950). Sin embargo König (1903) y Roaf (1930) encuentran una agudeza menor para el azul que para las otras longitudes de onda o el blanco. Otros resultados señalan que la agudeza es mejor con luz blanca que con cualquier otro color excepto quizá el amarillo (entre ellos Shaler, Smith y Chase, 1942).

Cuando se determina la agudeza visual a largas distancias (acomodación despreciable), es evidente que la aberración cromática axial (ACA) produce un notable desenfoque en el extremo azul del espectro y, en consecuencia, los valores de la agudeza en esa zona son más bajos. Sin embargo, en esa situación, la diferencia obtenida entre el azul y otros colores puede considerarse como una medida del efecto del ACA, pero no como una variación de la agudeza con la longitud de onda de la luz.

Recientemente, Capilla, Felipe, Pons y Artigas(1993) y Domenech y otros (1994), compensando adecuadamente la ACA y comparando las agudezas al mismo

nivel de iluminación retineana, demuestran que todavía se obtienen valores ligeramente inferiores de la agudeza visual con el color azul, mientras que las agudezas del rojo y del verde son idénticas a la obtenida con luz blanca. No obstante, el valor asintótico de la agudeza que se obtiene a partir de una cierta iluminación, sí que es el mismo para todo el espectro e igual al blanco, aunque el azul alcanza dicho valor para una iluminación algo más alta. En definitiva, cuando la agudeza se determina en condiciones estandar (con iluminación suficientemente alta) el valor que se obtiene es básicamente el mismo para todos los colores, como se mostraba en los trabajos clásicos.

IV.2. Factores ópticos

Consideremos ahora un estímulo que reúna las condiciones óptimas para que el observador pueda apreciar en él detalles espaciales pequeños. Teniendo en cuenta lo expresado en el apartado anterior, esto significa un estímulo con altos niveles de luminancia y contraste, que se observa durante un tiempo no limitado, de modo que sea posible obtener con él una buena agudeza visual.

Dado el estímulo, el siguiente paso en el camino hacia la percepción consiste en la formación de la imagen óptica del mismo. Centrando nuestra atención solamente en este paso, ignorando de momento influencias anteriores o posteriores, que ya se han analizado o bien se analizarán, es inmediato llegar a la conclusión de que la agudeza visual debe depender directamente de la fidelidad con que la óptica del ojo pueda reproducir el estímulo objeto en su correspondiente imagen retineana, ya que podemos pensar que una "buena" imagen conservará toda (o gran parte) de la información espacial contenida en el objeto. Obsérvese que implícitamente estamos utilizando un concepto de "calidad de imagen", entendiendo por imagen buena aquella que no ha perdido (o casi) la información espacial que contenía el objeto. En los tratados sobre formación de imágenes o instrumentos ópticos, suele decirse que no es fácil definir la calidad de imagen de forma general, pues depende del tipo de aplicación que se quiera dar a esa imagen. Es muy diferente el concepto de calidad cuando se persiguen fines

estéticos (fotografía, cine, etc) o cuando, como aquí, se pretende llegar a ver (sea detectar, reconocer o resolver) el mínimo detalle espacial. Por ejemplo, un ligero desenfoque en la imagen puede resultar conveniente en fotografía, proporcionando suavidad y belleza a una imagen; sin embargo, sería muy contraproducente en cualquier imagen, sea de un telescopio, microscopio, etc., en la que se pretenda tener una buena resolución. Por ello es necesario puntualizar que aquí nos vamos a referir a mejor o peor calidad de imagen según aumente o disminuya la posibilidad de distinguir detalles en ella.

Los factores ópticos que afectan a la agudeza visual serán pues aquellos que afecten a la calidad de imagen. Para la óptica geométrica, dejando aparte el desenfoque ya mencionado, son las aberraciones la causa del deterioro de una imagen, ya que dan lugar a la pérdida de la condición de estigmatismo (la imagen de un punto, en lugar de ser un punto es una mancha) o de cualquier otra condición de sistema óptico perfecto. Para la óptica ondulatoria, suponiendo la imagen perfecta desde el punto de vista del modelo geométrico (en ausencia de aberraciones, o sea satisfaciéndose todas las condiciones de sistema óptico perfecto) la difracción es el único factor que afecta a la calidad de la imagen. Tanto difracción como aberraciones producen en la imagen un efecto equivalente a un desenfoque; y esa falta de nitidez, que es tanto mayor cuanto mayores sean las causas que la producen (desenfoque, aberraciones o difracción), hace que se pierdan los detalles más finos de la imagen, lo cual implica una disminución en la agudeza visual. Como es sabido que la magnitud del efecto de la difracción, así como la de las principales aberraciones que afectan a la imagen retineana, depende fundamentalmente del diámetro pupilar, lógicamente se deduce que la pupila será uno de los principales factores ópticos con influencia sobre la agudeza visual.

IV.2.1. Desenfoque

La influencia del desenfoque en la agudeza visual nos resulta ya tan obvia que casi no nos parece un fenómeno digno de estudio y menos todavía que su existencia

necesite una comprobación. Desde muy jóvenes, todos hemos tenido, seguramente más de una vez, la experiencia de observar imágenes borrosas (como las denominaríamos en lenguaje vulgar) o desenfocadas; con ellas hemos podido aprender que en tales imágenes sólo se ven detalles gruesos ("de bulto" diríamos vulgarmente) y se pierde toda posibilidad de distinguir detalles finos. De modo que, sin darnos cuenta hemos ido asimilando el hecho de que una pérdida de nitidez en una imagen implica una reducción de nuestra capacidad visual, o en otras palabras, una disminución de nuestra agudeza visual.

Para evaluar de qué manera varía la agudeza con el desenfoque, basta con medir el valor de la agudeza colocándolo delante del ojo emétrope (o corregido de su ametropía) lentes de potencia progresivamente creciente (tanto positiva como negativa). El valor de la potencia de la lente corresponde directamente al desenfoque que se tiene en cada caso. Los resultados obtenidos con este tipo de medidas (Legge et al.,1987) indican que la agudeza varía de forma inversamente proporcional a una cierta potencia del desenfoque, es decir:

$$V = K/\Delta^n \quad (10)$$

donde el exponente n es ligeramente distinto según el signo del desenfoque pero, en primera aproximación, se puede considerar del orden de la unidad. También la constante de proporcionalidad K es ligeramente diferente según el signo del desenfoque, pudiéndose estimar del orden de 0.5.

IV.2.2. Pupila

Aunque en un razonamiento anterior, hemos deducido que la variación del diámetro pupilar debe ser un factor importante, y esto se deduce desde la óptica geométrica (aumento de las aberraciones al aumentar la pupila) y la óptica física (la difracción disminuye al aumentar la pupila), en el campo de la visión este hecho

empezó a intuirse a finales del siglo XIX. El primer estudio importante lo realizó Arnulf en 1948 utilizando miras de Foucault. El estudio se hizo variando tanto el contraste como la luminancia. Sin embargo tanto el trabajo de Arnulf como otros que se llevaron a cabo inmediatamente después, han acabado resultando irrelevantes ya que se hicieron las medidas del límite de separación, u , a un nivel de luminancia L fijo y, siendo variable el diámetro pupilar, lo que se debería de mantener fijo es el nivel de iluminación retineana, es decir el producto $L.S$ siendo S la superficie de la pupila. Así lo hizo Leibowitz en 1952. Con cada pupila ponía el nivel de luminancia L de modo que la iluminación retineana fuese equivalente a la obtenida con la pupila de 2 mm. La principal conclusión de su estudio, realizado con 7 tamaños diferentes de diámetro pupilar comprendidos entre 1 y 4.75 mm y 5 niveles de iluminación retineana, es que la mayor agudeza visual se obtiene con pupila de un diámetro intermedio, de unos 2-4 mm (véase Figura 8).

Siguiendo con nuestro razonamiento anterior, podíamos haber esperado este resultado. Una pupila grande, hace crecer el efecto de la aberración esférica que degrada mucho la calidad de la imagen retineana, sin embargo disminuye considerablemente el efecto de la difracción. Las pupilas muy pequeñas, por el contrario, minimizan el efecto de las aberraciones pero producen a cambio grandes efectos de difracción. Por tanto era de esperar que valores intermedios del diámetro pupilar fuesen los más adecuados para obtener la máxima agudeza. Un resumen del efecto de la pupila en la tarea de resolución se muestra en la Figura 9.

IV.2.3. Acomodación

Cuando se determina la agudeza visual (en minutos de arco) en función del estímulo acomodativo, esto es, la distancia de observación expresada en dioptrías, se encuentra que, existe una distancia intermedia óptima que presenta un máximo de agudeza, decreciendo suavemente tanto se alejamos el test como si lo acercamos (Figura 10). Este hecho, aparentemente sorprendente, es debido a errores en la acomodación.

Como es bien sabido, la respuesta acomodativa, o sea, la acomodación realmente desarrollada, sólo coincide con el estímulo acomodativo a una cierta distancia, que a veces se conoce como el "foco negro"; para un objeto situado por detrás o por delante del foco negro, la respuesta acomodativa se separa cada vez más del estímulo acomodativo (véase Fig. 12.14). Pues bien, si al determinar la agudeza visual a una cierta distancia de observación, el error acomodativo (derivado previamente de la función de respuesta acomodativa) es compensado mediante la lente correspondiente, entonces la agudeza resulta independiente de la distancia de observación.

IV.3. Factores neurales

Cuando se trata de instrumentos ópticos se suele hacer notar siempre el paralelismo que existe entre el ojo y la cámara fotográfica. Si bien el ojo tiene un funcionamiento bastante más complejo y sofisticado, esquematizándolo o simplificándolo mucho podemos decir que ambos instrumentos constan de una parte óptica y de otra fotosensible. Comencemos pues pensando en la cámara como caso más simple y extendamos después al ojo las conclusiones que extraigamos de ella.

En una cámara fotográfica, cuya calidad óptica se supone que es la mejor posible (recuérdese lo dicho en el punto anterior acerca de aberraciones y difracción), el poder de resolución depende del tamaño del grano de la película. Una película de grano grueso tendrá baja resolución mientras que una película de grano fino tendrá alta resolución. Dos puntos cuyas imágenes se formasen dentro de un mismo grano, después del revelado, se verían como si se tratase de un solo punto. Por tanto, se obtendrá mayor poder de resolución cuanto menor sea el grano de la película. Ahora bien, si la cámara tuviese una cierta pupila tal que la imagen de un punto, por efecto de la difracción, fuese mayor que el tamaño del grano, la difracción sería el factor que establecería el límite de resolución.. Por el contrario, si el tamaño del grano fuese más grueso, de modo que resultase mayor que el ensanchamiento que sufre la imagen de un punto debido a la

difracción, entonces el tamaño del grano decidiría el valor de la resolución máxima. Expresándolo en términos de frecuencias espaciales diríamos, que si la difracción es la que marca el límite, entonces la resolución coincidiría con la frecuencia de corte del sistema óptico (en ciclos/mm ó ciclos/grado) cuyo valor para una longitud de onda dada lo determina el diámetro de la pupila de tal modo que ambas magnitudes son directamente proporcionales (ver Capítulo Complementario 4); pero cuando el efecto de la difracción es pequeño la frecuencia de corte del sistema óptico es muy alta, de modo que se alcanza el límite de resolución mucho antes de llegar a su valor debido a que el tamaño del grano de la película permite separar un cierto número de ciclos/mm como máximo.

En resumen, en una cámara fotográfica libre de aberraciones, el tamaño del grano, nos permite calcular la frecuencia límite que la película permite registrar, y el tamaño de la pupila la frecuencia límite que transmite el sistema óptico. La menor de esas dos, será el límite de resolución de la cámara.

En el caso del ojo, el tamaño de la imagen de un punto debido a la difracción (radio del disco de Airy) viene dado por la ecuación (7), y teniendo en cuenta (5) la resolución puede calcularse por la expresión:

$$u = 4.186 \lambda / D \quad (11)$$

Sobre la base de estos cálculos se formularon algunas teorías, las llamadas teorías continuas, que intentaban explicar la agudeza visual considerando sólo la difracción y dando por hecho que la retina tiene resolución suficiente, esto es, ignorando la discontinuidad de la retina. Naturalmente, si se fija el valor de λ y del diámetro de la pupila, la resolución debería ser constante de acuerdo con esta teoría, lo cual sólo es cierto a altas luminancias y utilizando pupilas menores de 1 mm. El límite de resolución de la retina eliminando el efecto de la óptica del ojo, fue medido por Le Grand en 1935 formando franjas de interferencia directamente sobre la retina mediante la experiencia de Young de los dos pequeños orificios, encontrando que el límite es prácticamente el mismo que cuando se observa el test con visión natural, a altos niveles de luminancia.

Otras teorías intentaron explicar la agudeza visual sobre la base de la distribución y tamaño de los fotorreceptores en la retina. Como veremos a continuación, con sólo este factor tampoco se logra una explicación satisfactoria de los resultados experimentales. En la actualidad, se sabe que las teorías encaminadas a justificar los valores de la agudeza, deberán incluir además consideraciones neurofisiológicas sobre las complejas conexiones entre las terminaciones nerviosas de los distintos fotorreceptores de la retina, que dan lugar a agrupaciones de conos o de bastones y a efectos de sumación espacial. Es decir, el mosaico de la retina no es en sí mismo la clave de los problemas de la visión espacial (entre los que se encuentra la agudeza visual) sino que intervienen también etapas posteriores del proceso visual.

IV.3.1. Mosaico de receptores

Al definir la agudeza decimal, decíamos que se considera un minuto de arco el valor límite para la resolución del ojo normal. Sin embargo, nos puede haber sorprendido comprobar, en párrafos posteriores, que nunca las experiencias de detección, reconocimiento o resolución que hemos descrito dan ese resultado como límite, sino que en la práctica se llega hasta ángulos bastante más pequeños. ¿Por qué entonces se sigue tomando un minuto como límite clásico?

Fué Helmholtz quien consideró ese orden de magnitud para la resolución del ojo, e intentó justificarlo por el diámetro y distancia entre los conos de la fovea. Convencido de poder explicar la agudeza de un minuto por el mosaico de la retina, enunció un principio según el cual una red puede resolverse siempre que dos rayas, clara y oscura, consecutivas incidan sobre distinta fila de conos, pues, como le sugirió Weber (1846), para ver separados dos puntos vecinos es necesario que exista entre ellos un cono no excitado. No existe ninguna evidencia que sostenga esta hipótesis, los valores experimentales de agudeza más bien la desmienten. A pesar de ello la costumbre o la leyenda hace que las ideas de Helmholtz sigan apareciendo en los libros de *Optica Fisiológica* tal como aparecieron en su publicación original del mismo título. Creemos que mantener el valor de un minuto como agudeza standard puede tener ventajas

prácticas por razones de simplicidad de cálculo y hábitos adquiridos; pero sobre todo puede quedar también como un merecido homenaje a tan notable científico.

Entre los diversos argumentos en contra de una explicación de la agudeza basada en el mosaico de receptores, uno de gran importancia se deriva del hecho de que los conos de cada uno de los mecanismos cromáticos (rojos, verdes y azules) están desigualmente distribuidos en la fovea. Es difícil explicar la discriminación del color por los conos y a la vez comprender que la agudeza visual (suponiendo que dependiese de la separación entre conos) siga siendo alta con luces monocromáticas.

Una forma de dilucidar si el límite de resolución lo impone el mosaico de receptores o más bien la difracción, es decir, la propia naturaleza de la luz, consiste en situar la red directamente en la retina y disminuir progresivamente la separación entre las rayas hasta conseguir redes de mayor frecuencia que las que se pueden ver con pupila natural. Como se ha dicho antes, esta experiencia la llevaron a cabo Le Grand (1935), y posteriormente Byram (1944) y otros, aunque el método de formar franjas en la retina situando dos pequeños orificios o rendijas delante de la pupila fue propuesto originalmente por Helmholtz (1866). La distancia angular entre las rayas de la red se varía cambiando la separación entre las rendijas. Con esta experiencia se llega a resolver la red con un ángulo ligeramente más pequeño que el ángulo límite que se obtiene al medir la resolución con pupila natural. Hasta 21 segundos de arco se considera que las rayas son resueltas siendo éstas rectas y continuas, quedando por tanto fijado el límite en ese valor. Por debajo de los 21 segundos las líneas comienzan a curvarse y romperse y ya no puede considerarse que se está resolviendo la red, sino que se trata de efectos relacionados con otros fenómenos que no trataremos por el momento. Como punto de referencia, señalaremos que la medida del diámetro de los conos más finos de la retina se estima entre 2 y 2.5 μ lo que corresponde a ángulos alrededor de los 25 segundos. De aquí se concluye, y es una idea generalmente aceptada, que el mosaico de la retina tiene suficiente resolución para resolver todas las redes que permitan ser resueltas por la óptica del ojo.

Sin embargo, la afirmación que señala a la difracción como el límite de la resolución del ojo en condiciones normales de visión, basándose en que ésta no mejoraría nada o muy poco si aumentase la finura del mosaico, habría que matizarla. En realidad no se debería separar a la difracción de los demás factores ópticos porque, como hemos visto al tratar sobre ellos, casi nunca (salvo con pupilas menores de 1 mm) el sistema óptico está limitado por la difracción, ya que no se alcanza a resolver la frecuencia de corte teórica del sistema porque el efecto de las aberraciones prevalece, generalmente, sobre el de la difracción.

V.3.2. Adaptación

Al igual que los umbrales de luminancia, la agudeza, entendida como el umbral de la visión espacial, depende del estado de adaptación del ojo. Esto significa que depende de: luminancia del test, luminancia y tamaño del fondo de adaptación y tiempo de adaptación. Es un hecho bien comprobado que, con adaptaciones fotópicas, los mejores valores de agudeza se obtienen cuando las luminancias del test y del campo de adaptación son similares. Sin embargo con adaptaciones mesópicas o escotópicas la agudeza es ligeramente mejor cuando la luminancia del test es superior a la de adaptación (véase figura 11) y disminuye de nuevo por encima de un cierto valor.

En cuanto al tamaño del fondo, puede afirmarse que no tiene influencia alguna cuando la luminancia del test es débil, salvo que su luminancia sea muy superior a la del test. Cuando la luminancia del test comienza a ser fotópica la influencia del tamaño empieza a ser despreciable a partir de los 6° de diámetro. Con un test de 2° se ha comprobado que la agudeza crece con el tamaño del campo que le rodea si las luminancias del test y el campo son del mismo orden; y, por el contrario, decrece si la luminancia del campo es muy superior a la del test.

Para completar el estudio de la influencia de la adaptación nos referiremos brevemente al caso particular de adaptación a la oscuridad. El efecto de la adaptación a la oscuridad ha sido bien estudiado en diferentes experiencias variando el tipo, tamaño,

luminancia, etc. del test. Estas medidas de la agudeza realizadas en función del tiempo de adaptación a la oscuridad, son importantes por la información que de ellas se extrae acerca de la intervención de conos y bastones en la percepción de detalles espaciales. En efecto, cuando se mide la luminancia mínima que deben tener las rayas blancas de una mira de Foucault para resolver una frecuencia determinada correspondiente a un valor fijo, muy bajo, de la agudeza visual, en función del tiempo de adaptación a la oscuridad, se obtiene una curva similar a las curvas de adaptación que resultan al medir la detección de un test simplemente luminoso, esto es, el umbral absoluto. (Figura 12). Este hecho demuestra que conos y bastones participan, en general, en la resolución de redes aunque la contribución de unos y otros dependerá del nivel de luminancia y tamaño de la red utilizada.

IV.3.3. Localización retineana

En condiciones normales de visión, la agudeza visual siempre es máxima en la fovea y disminuye rápidamente a medida que aumenta la excentricidad, de tal modo que a los 10^0 ya se ha reducido a un tercio de su valor máximo aproximadamente. Esta disminución está de acuerdo con la distribución de conos y bastones en la retina y sus propiedades espaciales que se han visto en el Capítulo 1. Cuando el nivel de luminancia es escotópico, la agudeza resulta ser máxima para una excentricidad de unos 4^0 .

IV.4. Otros factores

Recordemos de nuevo, que al planear una experiencia de visión hay que establecer y fijar convenientemente el valor de un gran número de parámetros, cuya variación alteraría con toda seguridad el resultado de la experiencia. Máxime considerando que en gran parte de trabajos de visión, como es el caso de la agudeza visual, se trata de obtener cantidades tan críticas como son los valores umbrales de una cierta magnitud. Después de haber discutido con cierto detalle el grado de influencia de cada uno de los principales factores que afectan al valor de la agudeza visual, todavía

quedan algunos que no podemos ignorar aquí, aunque sólo les dedicaremos una breve atención.

En primer lugar, los factores subjetivos, que incluirían desde el estado de ánimo, el cansancio o el entrenamiento del observador, hasta la elección del método y del criterio a seguir para determinar cuando un test es visto o no por el sujeto. Todo ello afecta de forma evidente al resultado de la experiencia. Es sabido, por ejemplo, que en general los umbrales mejoran con el entrenamiento. También que el cansancio produce variaciones del diámetro pupilar, la fatiga dilata la pupila, por lo que empeorará la agudeza visual; e incluso si se utiliza pupila artificial, la fatiga afecta a las medidas puesto que disminuye la atención y el rendimiento del observador. Está comprobado que el cansancio y la falta de atención empeoran notablemente la estadística de las medidas produciendo un aumento en la desviación standard de los resultados.

Por último, nos referiremos a la edad. Hace más de un siglo que quedó estudiada y establecida la variación de la agudeza visual con la edad. A los diez años, o pocos años después, se alcanza la máxima agudeza visual del sujeto, aproximadamente a la misma edad en que se tiene el máximo de amplitud de acomodación. Su valor decimal puede ser de 2 y hasta de 2.5. Con la edad la agudeza decrece pero, en los sujetos emétopes adultos (entre los 20 y 40 años) suele mantenerse en un valor aproximadamente estable de 1.5 o algo menor. A partir de los 40 años ya comienza a decaer rápidamente; de modo que la agudeza unidad, considerada como "normal" para un sujeto adulto, en realidad se alcanza a los 50 años o más. A los 80 años la agudeza puede ser de 0.6, y a los 90 años de 0.3 o 0.2.