



UNIVERSIDAD COMPLUTENSE



5314260871

71-1943/2

T4466

ESTUDIO FISICO DEL NUEVO FENOMENO DE

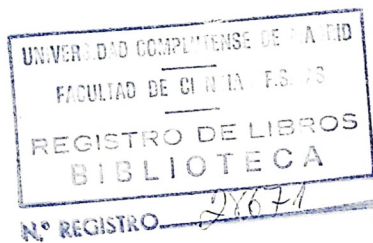
LA MIOPIA NOCTURNA

Memoria presentada para aspirar al grado
de Doctor en Ciencias Físicas.

ARMANDO DURAN MIRANDA

M A D R I D

Mayo de 1943



A mi padre, de quien en
años ya lejanos aprendí las
primeras ideas sobre Optica
fisiológica.

I N D I C E.

	Pags.
I. Introducción	2
A. Origen del problema	2
B. Rendimiento luminoso de sistemas ópticos	3
1ª. Factores geométricos y físicos	4
a) Tamaño de la pupila y aumento	5
b) Estado de corrección del sistema	6
c) Factores físicos	7
2ª. Factores fisiológicos	12
II. El ojo humano	13
A. Descripción anatómica	13
1ª. Esclerótica y córnea	14
2ª. Uvea	16
3ª. Retina	17
4ª. Cristalino.....	18
5ª. Humor acuoso y humor vítreo	20
B. El ojo como instrumento óptico	20
1ª. Medios ópticos	21
2ª. Constantes ópticas	22
3ª. Pupila y campo visual	25
4ª. Tamaño de la pupila con diversas lumino- sidades	28
5ª. Acomodación	31
a) Generalidades y mecanismo de la acom-	

	Pags.
dación	32
b) Teoría de Helmholtz	33
c) Teoría de Gallstrand	34
d) Teoría de Tscherning	35
e) Expensión, amplitud y velocidad en la acomodación	37
8 ^º Aberraciones	38
C. Modificación de la retina por el estímulo luminoso	41
III. La visión	45
A. Agudeza visual	45
B. Influencia de la luminosidad del estímulo y de la incidencia de los rayos	51
1 ^º . Adaptación	51
2 ^º . Visión crepuscular y fenómeno de Pur- kinje	52
3 ^º . Contraste e irradiación	54
4 ^º . Fenómeno de Aubert-Förster	55
5 ^º . Efecto de Stiles-Crawford	56
6 ^º . Visión periférica	57
C. Visión cromática	58
IV. Miopía nocturna	61
A. Medidas realizadas	64
B. Interpretación de resultados	69
V. Conclusiones	93

	Pags.
VI. Importancia de la miopía nocturna	95
VII. Final	96
Bibliografía.....	98

MIOPIA NOCTURNA

Se define la miopía nocturna del siguiente modo:

Cuando el esplendor del objeto contemplado por un
ojo con poder normal de acomodación es muy pequeño, disminu-
ye la distancia del punto remoto. El valor medio obtenido
para dicha variación es el de dos dioptrías (expresada e-
quivalente en estas unidades), en el sentido de que un ojo normal
se hace miope en dicha cuantía, mientras que un ojo hiperme-
trope de +2 dioptrías se comporta como emétrope en la oscu-
ridad.

I. INTRODUCCION

A. Origen del problema.

Estudiando de un modo sistemático los diversos factores que intervienen en el rendimiento luminoso de sistemas ópticos, se vió que las condiciones fotométricas se modificaban de un modo verdaderamente insospechado al alterar el estado de acomodación. Al principio pudiera atribuirse a condiciones especiales del observador, pero al cambiar éstos y reiterar las medidas, se vió de un modo claro que el hecho tiene un caracter objetivo. Esto hizo que se abandonase el camino iniciado para profundizar en este nuevo fenómeno que llamaremos de la miopía nocturna.

Antes de describirlo y dar los resultados obtenidos, es conveniente fijar los limites del problema, planteando primero las bases fundamentales a partir de las cuales se vá a realizar el estudio del fenómeno. Como éste perticipa de diferentes capítulos de la Optica, trataremos en esta primera parte de todos aquellos aspectos que sean necesarios para explicar la miopía nocturna, insistiendo en aquello que mas directamente intervenga y detallándolo por lo tanto mas

En cambio, capítulos muy interesantes que completarian el estudio sobre la visión, no podrán ser tratados con gran extensión y otros ni se mencionarán, por no creerlos necesarios para el estudio de la miopía nocturna, que es el objeto de la presente memoria.

B. Rendimiento luminoso de sistemas ópticos.

El estudio fotométrico de sistemas es de gran importancia sobre todo para instrumentos de observación nocturna, porque el conocimiento de factores cuya influencia es apreciable puede dar un camino para conseguir que el rendimiento luminoso sea el máximo, y por lo tanto óptimo el aprovechamiento.

Como el ojo no es capaz de acumular energía como sucede con una placa fotográfica, a la que una mayor exposición da más detalle, es necesario que la intensidad luminosa del estímulo haya transpuesto el umbral para el cual la visión es posible.

Como en el sistema óptico antepuesto al ojo existe pérdida de flujo luminoso, el estímulo que excita los órganos receptores del ojo tiene siempre una intensidad menor que la del objeto situado ante el sistema óptico. El rendimiento fotométrico de un sistema óptico puede ser medido por el grado de transmisión

$\tau = \frac{\Phi'}{\Phi}$ siendo Φ' el flujo luminoso que sale del sistema, y Φ el flujo luminoso incidente.

Nagel y Klughardt (1), lo definen como el cociente del rendimiento visual del ojo con antejo, y del rendimiento del ojo desnudo, entendiendo por rendimiento visual el valor inverso del ángulo bajo el cual se distingue todavía el objeto.

Ronchi (2) propone como definición para el rendimiento luminoso, el de comparación con un antejo tipo en el que se pueden variar pupilas y aumentos para poderlo poner en las mismas condiciones geométricas que el sistema que se vá a ensayar.

Las medidas ~~que~~ se hacen comparando poderes resolutivos en uno y otro caso, y el rendimiento fotométrico así definido, hay

que expresarlo refiriéndolo al patrón unidad.

La primera definición de rendimiento que hemos dado es completamente objetiva, presentando en cambio los inconvenientes de la exactitud de la medida del flujo luminoso antes y después del sistema y el no tener en cuenta el grado de corrección del sistema ni su poder separador. Las definiciones restantes presentan el inconveniente de ser eminentemente subjetivas, pudiendo ser modificadas por la diferente sensibilidad del individuo para el estímulo luminoso. Pero como en definitiva si el sistema óptico vá a ser empleado visualmente hay que utilizar forzosamente el ojo, tenemos una influencia grande de lo subjetivo, y por esta razón presenta un mayor interés el estudio de la miopía nocturna, ya que modifica extraordinariamente el rendimiento luminoso.

1ª. Factores geométricos y físicos.

Con arreglo a la primera definición dada de rendimiento fotométrico, es decir una definición puramente objetiva, los factores que intervienen son solamente físicos, entendiendo por tales todos aquellos que afectan directamente al sistema y que son en definitiva los que hacen que el flujo luminoso de salida, sea menor que el incidente.

Pero no hay que olvidar que ~~al intervenir el ojo viene ex~~ ^{además} ~~miendo~~ determinados ^{por} condiciones geométricas y fisiológicas como p. ej. el tamaño de la pupila del ojo y su relación con la de salida del instrumento.

Conviene por ello estudiar con detalle cada uno de estos factores.

a) Tamaño de la pupila y aumento.

El diámetro de la pupila de salida tiene que tener una gran importancia, puesto que un tamaño adecuado permite al ojo utilizar el máximo de luz, aumentando por tanto el rendimiento visual. La influencia de la pupila se vé claramente en la curva de Nagel (3), dada en la figura 1, en la

que como ordenadas se han tomado los valores del rendimiento visual, (valor inverso del ángulo subtendido por ^{la abertura} el anillo de Landolt cuya separación se percibe todavía) representando L_F el el rendimiento visual con anteojo y L_A el del ojo desnudo. Como abscisas se han tomado los logaritmos del cuadrado del diámetro de la pupila. Con esto demostró claramente Nagel la influencia de

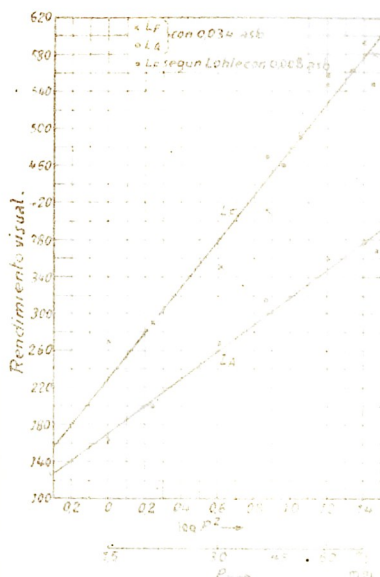


Fig. 1

ésta, rebatiendo la teoría del efecto de pupila, presentado por Löhle (4) movido por una discusión entre Burstyn y Kühn (5). Sobre el efecto de pupila volvieron a trabajar Kühn (6) y Strehl (7), sin que los resultados puedan darse como definitivos para resolver de un modo satisfactorio este problema.

No es sólo el tamaño de la pupila lo que influye, sino también el tamaño de la imagen como demuestran Krüger y Zennek (8) con

el dispositivo dado en la figura 2.

En el vidrio deslustrado se ponen figuras de la misma forma geométrica y tamaño diferente, disminuyendo poco a poco la intensidad luminosa de la lámpara, mediante el potenciómetro, observándose entonces que la primera que deja de verse es la mas pequeña. Fundándose en la variación del rendimiento luminoso con el aumento se han proyectado los test del umbralómetro construido en el Instituto "Alonso de Santa Cruz", para la selección de los observadores nocturnos. En ellos se han dibujado figuras semejantes (barcos, aviones) cuya visión de forma vá desapareciendo al disminuir la intensidad del estímulo, empezando por los de tamaño menor, y siendo el último el que tiene mayores dimensiones.

En la fórmulas que se han dado para expresar la influencia del anteojos en la visión crepuscular, intervienen el tamaño de la pupila y el aumento, como en la dada por Löhle (9):

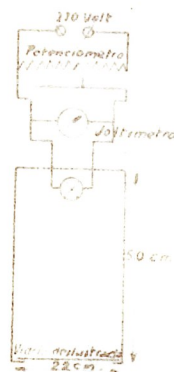
$$\text{Para ángulos visuales de } 0,1' \text{ hasta } 10' \quad E = \tau \left(\frac{y_{AP}}{y_P} \right)^2 \Gamma'^2$$

$$\text{" " " " } 20' \text{ a } 70' \quad E = \tau \left(\frac{y_{AP}}{y_P} \right)^2 \Gamma'$$

siendo: E la razón de los valores umbrales del esplendor del estímulo cuando se le observa con ojo desnudo y con anteojos.

τ el grado de transmisión del instrumento = $\frac{\text{flujo que sale}}{\text{flujo que llega}}$

y_{AP} radio de la pupila de salida del anteojos



y_p radio de la pupila del ojo

Γ' aumento del anteojo

Kühl (10) reuniendo las fórmulas de Riccò (11) y Piper (12), obtiene lo siguiente:

$$\text{agudeza visual con anteojo de día} = \Gamma' [S_A + 0,523 \log \frac{y_{AP}^2 1,40 \tau}{y^2}]$$

$$\text{agudeza visual con anteojo en crepúsculo} = \Gamma' S_A \left(\frac{y_{AP}}{y_p} \right)^{\frac{2}{3}} (1,40 \tau)^{\frac{1}{3}}$$

siendo S_A la agudeza del ojo desnudo, y poniendo 1,40 como valor del factor de contraste subjetivo a causa del ennegrecimiento de las paredes interiores del anteojo según las medidas de Hess.

Flügge (13) introduce el aumento de agudeza visual que define:

$$\frac{S_F}{S_A} = \Gamma' \frac{\log [4,5 + 1000 (2y_{PF})^2 \frac{\tau I}{(2y_p)^2}]}{\log [4,5 + 1000 I]} = \Gamma' L$$

siendo L un factor de corrección menor que la unidad, puesto que τ es menor que uno y $2 y_{PF}$ nunca será mayor que $2 y_p$, siendo y_{PF} el radio del haz de luz que saliendo del anteojo, es utilizado por el ojo.

Finalmente Nagel y Klugharat (1) dicen que:

$$S_p = a + b \cdot \log (2y_{AP})^2$$

siendo a y b constantes.

Utilizando el diafanómetro, Ronchi, ha obtenido G. Bochino (14) las relaciones entre la luminosidad y la pupila de salida. La luminosidad, para aumentos iguales, varía con la pupila de salida, no de un modo lineal sino siguiendo la ley:

$$L^2 = K y_{AP}^2$$

con la relación $(z-1) \Gamma' = \text{constante} = 8,35$

Si se mantiene constante la pupila de salida, la luminosidad varía proporcionalmente con el aumento, siguiendo la ley $L = a \Gamma' - b$ con los coeficientes a y b , distintos para cada pupila de salida.

5.) Estado de corrección del sistema.

Las aberraciones residuales del sistema tienen una importancia mayor de lo que pudiera creerse, ya que un buen estado de corrección no sólo permite mejorar la definición de la imagen, sino que influye también en el contraste, interviniendo en él de un modo muy apreciable la existencia del espectro secundario, que produce un velo cromático (15) sobre el que se forma la imagen, perdiéndose contraste y definición, aun en el caso de una perfecta corrección de la aberración esférica. Al formarse la imagen en zonas muy alejadas del eje, aparece coma, que hace perder precisión en la imagen. El astigmatismo, al repartir la luz sobre las superficies focales, produce una pérdida de luminosidad en la imagen. Son muchos los casos que se han presentado, sobre todo en Astronomía, en los que un estudio completo de las aberraciones de un objetivo ha permitido corregirlo, obteniéndose así imágenes que antes no se percibían.

Algunas veces, para disminuir las aberraciones residuales, hay que poner diafragmas que limitan la marcha de los rayos, modificando zonalmente el estado de ciertos factores.

De estos, intervienen de un modo considerable, como es lógico todos los que se refieren a la mayor luminosidad en el instrumento, es decir, desde un punto de vista geométrico, las razones de apertura y el sombreado, en el que por limitación de rayos existe una pérdida de luz apreciable.

c.) Factores físicos.

Los factores físicos se refieren exclusivamente a pérdidas de luz por absorción y por reflexión.

La absorción del vidrio depende principalmente del espesor, de la composición del mismo y de las impurezas. Sobre el espesor no podemos influir, ya que viene impuesto por el cálculo. La variación de la composición y la desaparición de impurezas exigen procesos en la fabricación, cuyo detalle no es ahora momento de desarrollar.

Podemos decir, por lo que atañe a sistemas que se utilizan en el espectro visible, que la absorción tiene una importancia relativamente pequeña que puede suponer una pérdida en el rendimiento del uno al dos por ciento por cm. del camino en vidrio.

Más importante que la absorción es la reflexión en cada superficie aire-vidrio, sobre todo en sistemas en los que el número de superficies es elevado. Además, del número de éstas, depende la pérdida por reflexión de la longitud de onda de la luz, del ángulo de incidencia de los rayos y del índice de refracción del vidrio. (fig. 3)

Para hacer desaparecer totalmente estas pérdidas

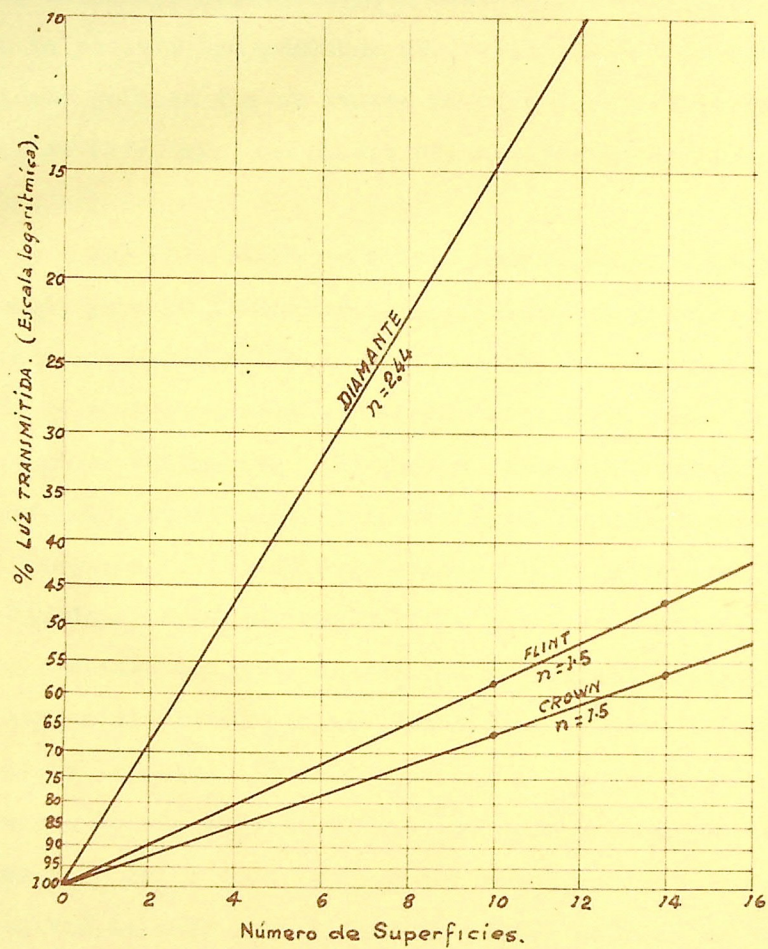


Fig. 3.

habría que conseguir que cada superficie de vidrio estuviese recubierta de una capa que gozase de la propiedad de tener un índice que variase continuamente desde la unidad hasta el índice del vidrio de la lente; pero como esto no es posible, se han intentado procedimientos físicos y químicos para disminuir en lo posible las pérdidas por reflexión. El primer procedimiento químico que se conoce ha sido descubierto por H. D. Taylor (16), sin que puedan encontrarse en la literatura detalles referentes a él.

Amy (17) ataca el vidrio con sulfuro de amonio, obteniendo para 10 láminas plano-paralelas de vidrio ($n = 1,515$), y con la luz normal a la cara, un factor de transmisión de 0,50 para los vidrios sin atacar y de 0,62 para los vidrios atacados. Kollmorgen (18) emplea también un procedimiento químico, que, como todos los anteriores, tiene el peligro de que el ataque a la superficie modifica las condiciones del vidrio, pudiendo alterar su sensibilidad para las manchas. Por esto, seguramente, han sido desechados los procedimientos químicos, y hoy en día se siguen más los físicos. Estos tienen como fundamento la obtención de una capa fina de una sustancia que recubre la superficie del vidrio. Esta capa ha de tener un índice $n_2 = \sqrt{n_3}$, y un espesor del orden de $\frac{\lambda}{2}$ siendo λ la longitud de onda para la que se quiere obtener la pérdida mínima por reflexión, n_2 , el índice de la capa y n_3 el del vidrio. Por las fórmulas de reflexión de Fresnel sabemos que

$$R_{12} = \left(\frac{n_1 - 1}{n_1 + 1} \right)^2 \quad R_{23} = \left(\frac{n_3 - n_2}{n_3 + n_2} \right)^2$$

para incidencia normal, siendo R_{12} ^{pérdida por} la reflexión en la superficie aire-capa y R_{23} la correspondiente a la superficie capa-vidrio. La medida del espesor de la capa presenta dificultades, habiendo sido resueltos por G. Bauer (19) a cuyo trabajo nos remitimos. La influencia del espesor de la capa y del índice puede verse en el trabajo de Turner, (20).

Strong (21), obtiene la capa depositándola por evaporación de fluorita y de magnesia, obteniendo para la primera un R_{23} de 0,1 por 100, mientras que para la magnesia es de 1 por 100. Para obtener una reflexión todavía menor, utiliza una capa de índice variable, depositando la fluorita de modo que sea compacta en las partes correspondientes a la superficie del vidrio y porosa en la del aire, de modo que los poros sean pequeños en comparación con la longitud de onda, trabajando a presión de 10^{-3} y 10^{-1} mm. de mercurio para obtener la capa porosa. Smekula (22), (23) deposita también una capa análoga con la que obtiene los siguientes valores:

Número de superficies aire-vidrio	2	4	6	8	10	12
Pérdidas por reflexión %	1,0	2,0	3,0	3,9	4,9	5,9

Blodgett y Langmuir (24), Castwright y Turner (25), emplean también procedimientos físicos que no difieren esencialmente de lo anteriormente expuesto no conociéndose detalles que ocultan bajo el secreto de patentes.

2.) Factores fisiológicos.

Los factores fisiológicos son de gran importancia, ya

que algunos de ellos, como p. eje. el diámetro de la pupila del ojo, impone condiciones geométricas que ha de cumplir el sistema. La constitución de la retina, la manera de comportarse el ojo ante las diferentes luminosidades y el proceso visual, influyen en la manera de percibir la imagen.

Como para la interpretación del fenómeno necesitamos plantear de un modo mas concreto el problema fisiológico, dejemos el estudio de éste para los capítulos siguientes sin hacer en este momento nada más que indicar su existencia.

II AL OJO HUMANO

Sin entrar en detalles fisiológicos, el estudio que nos preocupe obliga a una descripción somera en la que se traten aquellos aspectos que interesan al problema, indicando sus funciones en la visión, sin olvidar el estudio del ojo como instrumento óptico, ni las modificaciones producidas en la retina por la luz.

A. Descripción anatómica.

Las dimensiones aproximadas del globo ocular son:

Eje entero posterior	24,2 mm.
Eje transversal	24,1 "
Eje vertical	23,6 "

y debemos aproximar puesto que existen variaciones no sólo

de persona a persona, sino con la edad, y por eso las dimensiones dadas anteriormente son sólo a título informativo para dar una idea del orden de magnitud.

El ojo desde el punto de vista anatómico puede ser estudiado en el orden siguiente:

- 1ª esclerótica y córnea
- 2ª úvea
- 3ª retina
- 4ª cristalino
- 5ª humor acuoso y humor vítreo.

Estudiamos así las diferentes capas que constituyen el ojo, marchando con la luz de fuera a dentro, dejando para el final el estudio del cristalino y de los medios líquidos que tienen para nosotros más interés óptico que anatómico. La figura 4 representa un corte esquemático del ojo y a ella se refieren las indicaciones dadas en este capítulo.

1ª Esclerótica y córnea

La envoltura externa está formada por la esclerótica y la córnea, cuyo principal cometido es el de protección, estando por ello constituida por fibras fuertes de tejido conjuntivo.

La esclerótica no juega papel alguno desde el punto de vista óptico, pero en cambio la córnea sí lo tiene, e importante. Por eso debe ser transparente, y para que esta condición se cumpla necesita, por una parte, estar constituida de un modo homogéneo por láminas igualmente refractivas y con

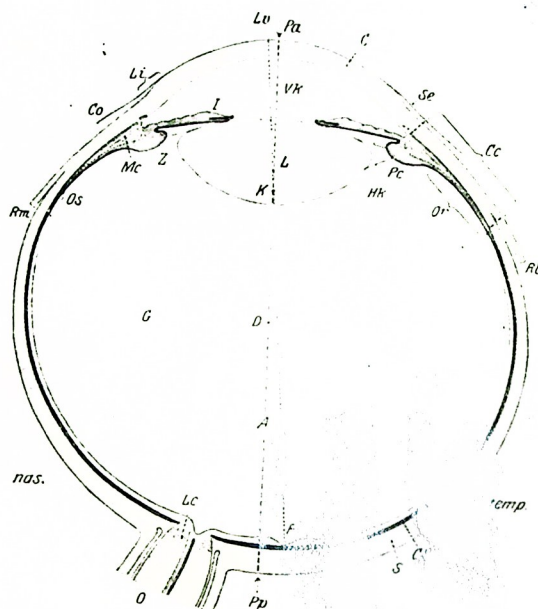


Fig. 1. Sección horizontal del globo del ojo de un adulto. Aumento, cuatro veces.

A, eje geométrico del ojo; C, córnea; V, cuerpo vítreo; L, cristalino; LC, lámina cribosa; LI, limbo; I, iris; N, punto nodal; O, punto óptico; R, tendón del músculo recto interno del ojo; S, esclerótica; Se, seno esclerótico; Z, zona; Rm, músculo recto medial; Re, músculo recto externo; Rs, músculo recto superior; Ri, músculo recto inferior; Rl, músculo recto lateral; Rp, músculo recto posterior; Ra, músculo recto anterior; Rse, músculo recto superior externo; Rsi, músculo recto superior interno; Rie, músculo recto inferior externo; Rii, músculo recto inferior interno; Rle, músculo recto lateral externo; Rli, músculo recto lateral interno; Rme, músculo recto medial externo; Rmi, músculo recto medial interno.

Fig. 4

escasas células entre ellas, y por otra, una ausencia total de tejido no transparente, especialmente vasos sanguíneos. La córnea está limitada por superficies esféricas; mejor pudiera considerarse como un casquete de elipsoide cuyos radios de curvatura fuesen:

Radio de curvatura en el vértice en un plano horizontal 7,8 mm. aproximadamente.

Radio de curvatura en el vértice de un plano vertical 7,7 mm. aproximadamente.

Como la diferencia de curvaturas es muy pequeña, podemos considerar que prácticamente sólo tiene influencia a partir de una pupila de 2 a 3 milímetros de diámetro, mientras que para pupilas inferiores podemos suponer la córnea como constituida por superficies esféricas.

La unión de la córnea con la esclerótica, con las hipótesis anteriores, sería la curva de intersección de un elipsoide con una esfera, considerando la esclerótica como una esfera de 24 mm. de diámetro. Dicha curva vista por delante, tendrá que tener la forma de una elipse y ésto lo confirman las medidas experimentales que dan un eje mayor horizontal de 12,5 mm. y otro menor vertical de 11,0 mm.

2.º. Uvea

La túnica ocular media llamada úvea, está constituida por el iris, el cuerpo ciliar y la coroides, su función principal es la de nutrir el sistema nervioso del

globo ocular, estándole además encomendada al iris la misión de limitación de rayos, ya que constituye el diafragma de apertura del sistema óptico del ojo. De acuerdo con la función nutricia, es muy vasculada, segregando el humor acuoso en el polo anterior y proporcionándole a la retina en el polo posterior sustancias necesarias para su funcionamiento normal.

Como entre las sustancias que segrega el polo posterior se encuentran las necesarias para la formación de la púrpura, tiene la úvea una función óptica importante, ya que según veremos más tarde, la púrpura juega un papel extraordinariamente interesante en la visión. Además de esto, actúa el iris como diafragma de apertura, según se ha dicho repetidas veces. El iris es una membrana circular extraordinariamente elástica, cuyas variaciones de diámetro están reguladas por dos músculos de misión antagónica: el esfínter y el dilatador de la pupila. El primero está formado por fibras lisas, constituyendo un anillo de 1 mm. de ancho colocado muy próximo al orificio libre del iris. El dilatador cubre toda la base de éste (cara mas próxima al cristalino) llegando hasta el mismo borde sobre el que monta ligeramente. La acción conjunta de ambas, produce la dilatación o la contracción del iris.

3^a. Retina.

La túnica interior la constituye la retina que es una membrana transparente sobre la que se forma la imagen.

En la parte posterior se encuentra la fovea central, que es una depresión, que, por presentar una coloración amarillenta en los ojos amuleados, se llama mancha amarilla (mácula lútea).

El estudio histológico muestra una serie de capas cuya forma indica la figura 5. En ella encontremos que la luz tiene que atravesar las capas encargadas de la transmisión (capa cerebral) antes de llegar a la zona sensible de la luz (epitelio sensorial). En ésta encontremos dos clases perfectamente diferentes de los órganos foto-sensibles: los conos y los bastones. Los primeros, que se encuentran principalmente en la fovea central, en donde no existen los segundos, van disminuyendo en número a partir del borde de la fovea, a medida que aumenta el de bastones, que se extiende hasta la ora serrata. De los conos y bastones parten ramificaciones de tejido nervioso que se reúnen en el nervio óptico. No es éste el lugar más adecuado para entrar en un estudio de los tejidos y elementos que existen en la retina; basta solo el resumen ya indicado, puesto que ello es suficiente para nuestro estudio. La misión de la retina es la de transformar la imagen óptica en imagen nerviosa, para poder llegar así a la sensación, entrando en el terreno de la psicología del sentido visual, que se sale por completo del objeto del presente trabajo.

4º. Cristalino.

El cristalino se encuentra entre el iris y el cuer-

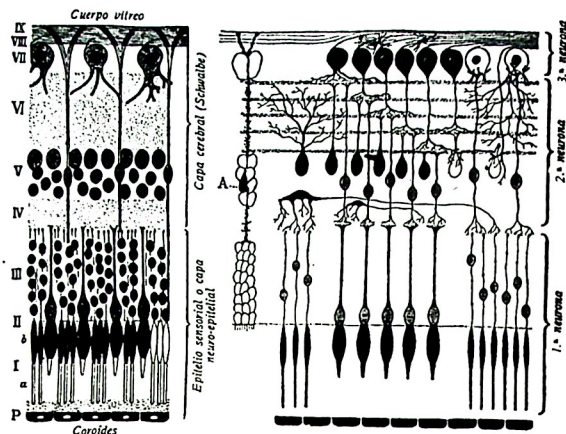


FIG. 376. Estructura de la retina (esquema).

P, epitelio pigmentario; I, conos y bastones (capa de las células visuales de Cajal); a) segmentos externos, b) segmentos internos; II, membrana limitante externa; III, capa de los cuerpos de las células visuales (antigua capa de los granos externos); IV, capa basal (células basales y plexo basal [capa plexiforme externa de Cajal]); V, capa de las células bipolares o granos internos; VI, capa de las células unipolares (amacrinas de Cajal) y capa plexiforme interna (Cajal); VII, capa de las células ganglionares o multipolares; VIII, capa de las fibras del nervio óptico; IX, membrana limitante interna; A, fibras de Müller o de sostén.

Fig. 5

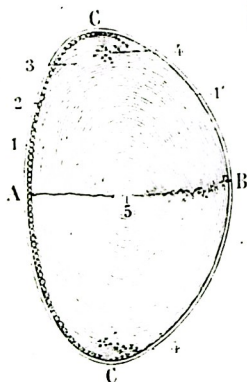


Fig. 176 bis
Sección meridiana del cristallino.
(Según BABCHINS). (TESTU).

A, cara anterior; B, cara posterior;
C, equador; 1, cristaloides anterior;
1', cristaloides posterior; 2, capa epitelial; 3, masas de las fibras cristalinianas; 4, nucleos de las fibras dispuestas en S en la región ecuatorial; 5, núcleo del cristallino.

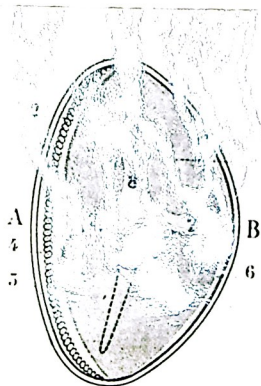


Fig. 176 ter
Esquema en un corte sagital del cristallino, de la disposición de la sustancia amorfa. (Según TESTU).

A, polo anterior; B, polo posterior;
C, equador; 1, capsula o cristaloides;
2, capa de las células; 3, masa de las fibras; 4, capa de cemento supraepitelial; 5, capa de cemento subepitelial; 6, capa posterior; 7, masa central, con 8, radio estelar superior.

Fig. 6

po vítreo, y su posición se mantiene gracias a la zómbula. Como al estudiar la acomodación hemos de ver las diferentes teorías de la acción de los músculos sobre el cristalino, podemos ahora prescindir de ellas, pero no de su constitución. El cristalino está formado por capas de fibras transparentes, teniendo en el centro un núcleo cuyas dimensiones crecen con la edad. (fig. 6)

5ª. Humor acuoso y humor vítreo.

Entre la córnea y el cristalino existe una cámara llena de un líquido que, por su densidad y por su índice de refracción, se asemeja mucho al agua. Entre el cristalino y la retina existe una sustancia de aspecto gelatinoso llamada humor vítreo. Las funciones asignadas a dichos humores, que son transparentes, tienen importancia óptica, y de ellos se derivan sus características, que veremos al tratar del ojo como instrumento óptico.

B. El ojo como instrumento óptico

Hemos tratado anteriormente el ojo desde el punto de vista anatómico, debiendo ahora estudiarlo como instrumento óptico, ya que como tal va a ser empleado. Para ello necesitamos dar las constantes ópticas de cada uno de sus medios, estudiando además la limitación de rayos y las aberraciones, dedicando un estudio especial a la acomodación que juega un papel muy importante en el presente trabajo.

1^a. Medios Ópticos.

Marchando la luz de córnea a retina, los medios ópticos que atraviesa son los siguientes: primeramente la córnea, después el humor acuoso, a éste sigue el cristalino y finalmente el humor vítreo, formándose la imagen en la retina. Como veremos en las tablas resumen de constantes ópticas del ojo, los índices de refracción de todos estos medios son muy próximos, y por lo tanto las refracciones grandes necesarias para la formación de imágenes en la retina han de ser a costa de las curvaturas. Como no cabe una deformación del globo ocular para poder formar la imagen sobre la retina cuando el objeto se desplaza, es necesaria una variación en curvatura y en índices, que se verifica en el cristalino. Por eso el estudio de éste es el que presenta gran interés. El jesuita P. Cristobal Scheiñner (26) fué el primero que, en 1619, estudió de un modo mas profundo los problemas de la facilidad de enfoque del ojo, es decir, la inmovilidad de la imagen al desplazarse el objeto. Esto ya lo conocia Kepler (27), aunque no llegó a formular conclusión alguna.

Scheiñner en cambio indica dos posibilidades sin decidirse por ninguna: o variaba la distancia entre el cristalino y la retina o cambiaban los radios de curvatura de las superficies del cristalino. En el siglo XVIII se atribuía a la variación del medio de la córnea todo el proceso de enfoque, hasta que en 1800 Young (28) demostró de modo indudable la falsedad de la hipótesis.

Pero el primero que realmente decidió de un modo terminante la participación del cristalino fué Gullstrand (29), que estableció por primera vez las leyes de formación de imágenes en medios formados por capas.

El cristalino está formado por una serie de capas superpuestas, pudiéndose determinar en él, como lo hizo Gullstrand, las curvas de igual índice, que son las indicadas en la fig. 7. Por su constitución laminar y por la forma de las curvas de igual índice, se vé que cuanto mayor es la acomodación mayor tiene que ser el índice, y así es en efecto, ya que se encuentra 1,4263 en el caso de acomodación máxima, y 1,4080 para el reposo.

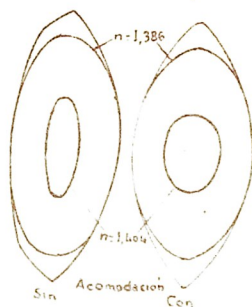


Fig. 7

Las variaciones en curvas y las variaciones en índices nos permiten formar la imagen siempre en el mismo lugar.

En la tabla que damos a continuación encontramos agrupadas las constantes ópticas y ello nos va a permitir no entrar en ^{el} detalle de cada uno de los medios.

2ª. Constantes ópticas.

La determinación de las constantes ópticas del ojo presenta grandes dificultades, ya que muchas de ellas pueden ser determinadas en vivo, pero en cambio otras tie-

nen que ser obtenidas en ojo muerto, por lo que puede existir variaciones considerables.

Apesar de la limitación señalada anteriormente y del hecho de que de persona a persona y en el transcurso de la vida existan variaciones, conviene tener unos valores que puedan ser utilizados para el cálculo Listing (30), dió unas constantes y unos valores para un ojo medio; mas tarde otros investigadores han modificado sus medidas. Damos a continuación una tabla de valores obtenidos por Gullstrand (31), en donde estan puestas dos columnas, una que lleva como epígrafe exacto que esté referida a medidas ópticas con espesores, mientras que en la que corresponde a aproximada no se tiene ésto en cuenta.

VALORES DE GULLSTRAND

Todos los datos están dados en mm.; suponemos que la luz va de izquierda a derecha.

<u>INDICES DE REFRACCION</u>	<u>EXACTO</u>		<u>APROXIMADO</u>	
	OJO EN RE- POSO	OJO EN MA- XIMA ACOMODACION	OJO EN RE- POSO	OJO EN MAXIMA ACOMODACION
Córnea	1,376	1,376		
h. acuoso y h.vitreo	1,336	1,336	1,336	1,336
crystalino	1,386	1,386	1,413	1,424
" equivalente	1,406	1,406		
<u>POSICIONES</u>				
Vertice anterior de córnea	0	0	0	0
vértice posterior de córnea	0,5	0,5		

	<u>Exacto</u>		<u>Aproximado</u>	
	Ojo en reposo	Ojo en maxima	Ojo en reposo	Ojo en maxima
vértice anterior del cristalino	3,6	3,2		
vértice anterior del cristalino equiv....	4,146	3,8725		
vértice posterior del crist. equiv.....	6,565	6,5275		
centro óptico del cristalino			5,85	5,2
vértice posterior del cristalino	7,2	7,2		
<u>RADIOS</u>				
1ª superficie de córneas	7,7	7,7		
2ª superficie de córneas	6,8	6,8		
superficie de la córnea equivalente			7,8	7,8
1ª superficie del cristalino	10	5,33	10	5,33
1ª superficie del cristalino equiv....	7,911	2,655		
2ª superficie del cristalino equiv. ..	-5,76	-2,655		
2ª superficie del cristalino	-6	-5,33	-6	-5,33
<u>POTENCIAS</u>				
1ª superficie de la córnea.....	48,83	48,83		
2ª superficie de la córnea	-5,88	-5,88		
superf. de la córnea equivalente			43,08	43,08
1ª superficie del cristalino	5	9,375	7,7	16,5
cristalino equival.	5,985	14,96		
2ª superficie del cristalino	8,33	9,375	12,833	16,5
<u>CORNEA</u>				
Potencia	43,05	43,05	43,08	43,08
Posición punto principal objeto	-0,0496	-0,0496	0	0
Posición punto principal imagen	-0,0506	-0,0506	0	0

	<u>Exacto</u>		<u>Aproximado</u>	
	Ojo en re- poso	Ojo en ma- xima	Ojo en re- poso	Ojo en ma- xima
distancia focal ob- jeto	-23,227	-23,227	-23,214	-23,214
distancia focal ima- gen	31,031	31,031	31,014	31,014
<u>CRISTALINO</u>				
Potencia	19,11	33,06	20,53	33
Posición del punto principal objeto ..	5,678	5,145	5,85	5,2
posición del punto principal imagen ..	5,808	5,255	5,85	5,2
distancia focal ...	69,908	40,416	65,065	40,485
<u>OJO COMPLETO</u>				
Potencia	58,64	70,57	59,74	70,54
Posición del punto principal objeto ..	1,348	1,772	1,505	1,821
posición del punto principal imagen ..	1,602	2,086	1,631	2,025
posición del foco objeto	-15,707	-12,397	-15,235	-12,355
posición del foco im- agen	24,387	21,016	23,996	20,963
Focal objeto	-17,055	-14,169	-16,740	-14,176
focal imagen	22,786	18,930	22,365	18,938
posición de la fovea central	24	24	24	24
refracción axial	1,0	-9,6	0	-9,7
posición del punto práximo		-102,3		-100,8
posición de la pupi- la de entrada	3,047	2,668	3,048	2,671
posición de la pupi- la de salida	3,667	3,222	3,519	3,096
aumento lateral en las pupilas	0,909	0,941	0,916	0,943

3°. Pupila y campo visual.

Si la limitación de rayos es siempre importante en todo sistema óptico, de tal modo que de la colocación del diafragma dependen muchas veces la precisión de la imagen, lo es tanto mas en el ojo

como instrumento óptico, ya que no solamente puede tener la misión de actuar sobre la corrección, sino que tiene una misión de protección ante un exceso de luz. Esto se realiza principalmente gracias al diafragma de apertura que es el iris. La imagen del iris a través del humor acuoso y de la córnea, constituye la pupila de entrada y su imagen a través del cristalino y el humor vítreo forma la pupila de salida. Estas pupilas no tienen una posición fija y determinada, puesto que al variar la curvatura del cristalino se desplaza la pupila como se ha indicado ya en el cuadro dado anteriormente. Al dilatarse o contraerse el iris, disminuye o aumenta el diámetro de la pupila y por lo tanto se altera la razón de apertura que pasa a ser de 1:18 durante el día a 1:2 en la visión crepuscular.

Como sabemos, el campo está limitado por el diafragma de campo que en el ojo, considerado aisladamente, no existe. Su limitación viene impuesta por la nariz, cejas, etc., que hace que, en lugar de ser de 180° , sea de 150° como ve-

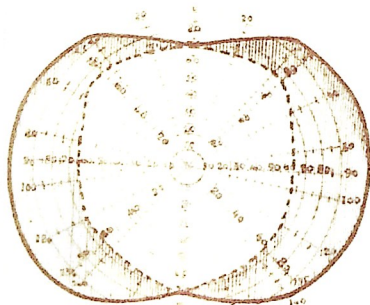


Fig. 8

mos en la figura 8, en la que los valores angulares corresponden a ángulos medidos sobre la esfera que tiene su centro en el ojo que se supone inmóvil. La superposición de los campos correspondientes al ojo derecho y al izquierdo respectivamente, da lu-

ger a una zona llamada de visión binocular.

Pero el ojo, que es un instrumento óptico de gran campo visual, sólo da imagen nítida en una región limitada; el resto aparece como esfumado sin que se puedan percibir detalles que caractericen al objeto. A la visión central corresponde la visión de detalle, mientras que en los bordes del campo sólo se perciben las formas de un modo confuso.

Esta limitación en la definición de la imagen viene compensada por la movilidad del ojo que nos permite percibir mas campo del que en realidad corresponde al ojo quieto

4^a. Tamaño de pupila con diversas luminisidades

Hemos dicho anteriormente que el iris actuando como diafragma de apertura tiene como una de sus misiones evitar que un exceso de luz pueda ser perjudicial a la región fotosensible del órgano visual. Para esa misión protectora el iris se contrae o se dilata, siendo sus movimientos independientes de la función retiniana como señalan Nagel y Klughardt (32). El estudio de la influencia de la intensidad luminosa en el diámetro de la pupila puede hacerse fácilmente cuando la luz permite distinguir con detalle el contorno de la pupila, empleándose entonces los aparatos llamados pupilómetros.

El pupilómetro de Broca (33), o el que rectificó Moss, parten del método de Frick, que damos esquemáticamente

en la figura 9.

Se supone que el ojo está acomodado al infinito. Si O_1 y O_2 son dos fuentes luminosas puntuales y P es la pupila del ojo,



se formarán en la retina R dos círculos de dispersión de diámetros $O'O'_1$ y $O'O'_2$ respectivamente, que serán tangentes en O' siempre que la distancia O_1O_2 sea igual al diámetro de la pupila de entrada del ojo. Si la distancia O_1O_2 fuese menor que el diámetro, entonces O' estaría dentro de la retina y los círculos se acortarían, mientras que si O_2 fuese mayor, O' estaría delante y los círculos serían exteriores. Por lo tanto desplazando los puntos hasta que el ojo perciba los dos círculos tangentes, se habrá obtenido mediante la medida de la distancia O_1O_2 el diámetro de la pupila de entrada. Si el ojo no estuviese acomodado al infinito, se vé fácilmente que por un cálculo sencillo puede conocerse el diámetro de la pupila, cálculo que puede encontrarse en el trabajo de Broca. Sobre este principio se fundan los pupilómetros de los tipos mencionados, que no describimos puesto que dado el fundamento, todos ellos son modificacio-

nes que afectan a la construcción mecánica y no a la teoría.

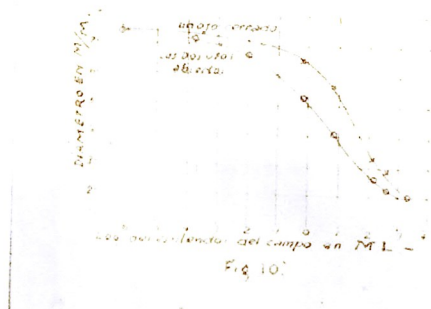
Van Liempt y de Vriend (35), han medido el tamaño de la pupila (utilizando un pupilómetro Broca-Moss) en función del esplendor y de la longitud de onda, encontrando que el tamaño de la pupila crece con la longitud de onda, teniendo un salto en la región 570-590 m μ .

Antes ya habían encontrado Luckiesh y Moss (36) que la superficie de la pupila iluminada con luz de sodio es mayor en un 10 % de la iluminada con luz artificial corriente, a igualdad de iluminación.

Con luces mezcladas no se encuentra una ley aditiva; mas bien parece que el diametro de la pupila corresponde a la longitud de onda menor. Todas las medidas anteriores se habían hecho por métodos visuales, para los que se necesita una intensidad luminosa suficientemente grande para poder distinguir con detalle la pupila, pero faltaba la determinación del diámetro de ésta con bajas luminosidades. Hasta la publicación del trabajo de Nagel y Klughardt (32) que describiremos más tarde, las medidas de Blanchard (37) han sido las mas utilizadas y aunque el objeto de su trabajo era la medida de la variación de la sensibilidad retiniana con el esplendor, estudio el tamaño de la pupila para poder conocer la cantidad de luz que llega a la retina. Nos limitamos ahora a describir el procedimiento y los valores obtenidos para el diámetro de la pupila, dejando para lugar oportuno las medidas de la sensibilidad retiniana.

El procedimiento que utiliza es el siguiente: Delante de la cámara fotográfica, y dejando un orificio para el objetivo, se coloca una pantalla blanca que se ilumina con determinado esplendor. Proximamente en el plano de la pupila se coloca una escala, que es la que va a servir mas tarde para la determinación del tamaño. La fotografía hecha con luz de magnesio o equivalente da al mismo tiempo la escala y la pupila, pudiendo de este modo hacerse medidas, ya que las deformaciones que pueda sufrir la placa, serían las mismas para la escala que para la pupila, con lo cual la medida puede hacerse con garantía. Solo queda como error el de colocación en la escala respecto del plano de la pupila, pero como es pequeño podemos despreciarlo, ya que las medidas no necesitan una precisión excesiva.

Al tener un ojo cerrado, éste tendrá su pupila dilatada, y por simpatía hará que el otro esté más abierto que lo que pueda corresponderle en relación con el esplendor, por eso las medidas se han hecho en los dos casos, dándose los valores en las tablas que damos a continuación y cuya representación gráfica se da en la fig. 10



DIAMETRO DE LA PUPILA

Esplendor en Ml.	Diam. Mm.	
	ambos ojos abiertos	un ojo cerrado
0.0	7.4	7.5
0.00015	7.15	7.25
0.01	6.7	7.2
0.6	5.3	6.5
6.3	4.1	5.7
126.	2.6	3.3
355	2.3	2.9
2.000	2.0	2.0

A un Ml. corresponden 10 apostilb.

De este mismo estudio se han ocupado Abelsdorf (38) Munting (39) Reeves (40) cuyos trabajos no resumimos porque no introducen modificaciones esenciales en los valores respectivamente de Blanchard y el de Naggel y Klughardt.

La fotografía con la luz relámpago, tiene el inconveniente de dejar con la duda si la inercia del músculo ciliar será suficiente para no falsear las medidas. Para resolverlo no queda otra solución que la fotografía con rayos infrarrojos, y así lo abordaron Naggel y Klughardt (32), encontrando que el diámetro de la pupila está relacionado con el esplendor mediante la ley:

$$P = 6,55 - 0,4 \log. B$$

Si en la ecuación anterior se calcula el esplendor correspondiente a una pupila de 8 mm., se encuentra 0,00024 asb.

Para la misma persona se encuentra que el umbral de orientabilidad corresponde a 0,00025 asb. Este resultado concordante parece indicar que el límite de la dilatación de la pupila

la está condicionado por el umbral de orientabilidad. Posteriormente Herman (41) se ha vuelto a ocupar del tamaño de la pupila sin que conozcamos sus resultados.

5) Acomodación

a) Generalidades y mecanismo de la acomodación.

En la tabla de Gullstrand dada en el capítulo en el que tratábamos del ojo como sistema óptico, se encuentran diferentes valores para las constantes ópticas según que el ojo esté en reposo o acomodando, es decir con el ojo mirando a un objeto muy lejano, o con el ojo mirando a un objeto próximo. Las variaciones que sufre el ojo al acomodar tienen que modificar forzosamente las constantes ópticas del sistema. Esta variación que permite modificar la visión de modo que sea factible para un objeto muy lejano o para uno próximo se llama acomodación. Su estudio ha preocupado desde los tiempos más remotos del conocimiento, hasta el día de hoy, y se han emitido diferentes hipótesis sin que hasta la fecha exista una teoría rigurosamente cierta. Se ha supuesto alguna vez que la causa de la acomodación se encontraba en la retracción de la pupila, pero fácilmente se demostró que no podía ser así ya que la aniridia no suprime la acomodación. Se ha creído también que pudiera ser debido al cambio de curvatura en la córnea, pero el célebre experimento de Young que colocaba delante del ojo una capa de agua, cuyo índice es próximamente igual al de la córnea, eliminando así la influencia de su curvatura, y demostró que la acomodación no es debida a alteraciones corneales. El

alargamiento del eje anteroposterior del ojo pudiera ser una causa que también elimina Young (28), y un cálculo posterior de Tscherning (42) demostró que el ojo no puede cambiar de forma en todo lo que sería necesario si a la deformación sólo, se debiera la acomodación. El hecho reconocido y admitido hoy en día por todos, es que el cristalino varía sus curvaturas, habiéndose construido sobre esta base las diferentes teorías que hoy existen sobre el proceso de la acomodación. El mérito de esta hipótesis hay que atribuirlo a Descartes (43) aunque no la haya podido comprobar.

Las tres teorías más importantes que hoy en día existen, son las de Helmholtz, Gullstrand y Tscherning, que vamos a exponer en el orden dicho.

b) Teoría de Helmholtz.

Helmholtz (44) utilizando sus propias observaciones y las de Cramer y Langenbeck da una teoría que califica como la más posible. Dice que para la visión de objetos lejanos, el cristalino tiene sus radios de curvatura mayores y un espesor menor, que para la visión de objetos próximos. A esta conclusión llega al ver que el tamaño de la imagen obtenida sobre la primera superficie del cristalino, no puede explicarse solamente por el desplazamiento del cristalino, y sí por un aumento de su curvatura. Este resultado que obtiene por interpretación teórica de un hecho experimental, lo confirma con medidas.

Como valores medios podemos dar los siguientes: (44)

Ojo	Radio de curvatura de la primera superficie del cristalino		Desplazamiento de la pupila en la acomodación
	Ojo en reposo	Ojo con acomodación	
O.H.	11,9	8,6	0,36
B.P.	8,8	5,9	0,44
J.H.	10,4		

Una vez visto que el aplastamiento del cristalino explica la acomodación, necesitaba dar la teoría fisiológica y para ello decía que en el estado de reposo la zónula ejerce una tracción tónica en sentido centrífugo sobre los bordes del ecuador del cristalino, mientras que al acomodar la contracción del músculo ciliar adelanta las extremidades posteriores de la zónula, relajándose ésta y disminuyendo por lo tanto la tensión que ejerce sobre el cristalino, que tiende por ello a aumentar su curvatura. La forma que adquiere es la que puede verse en la fig. 11 en escala 5:1 dada por el mismo Helmholtz.

6) Teoría de Gullstrand.

Gullstrand (31) que califica de genial la hipótesis de Helmholtz, la amplía con las observaciones hechas en el tiempo transcurrido entre uno y otro, para confirmarle en su idea fundamental. Como Helmholtz mantiene el principio general de la relajación de la zónula para la visión próxima, el aumento de curvatura del cristalino y el aumento

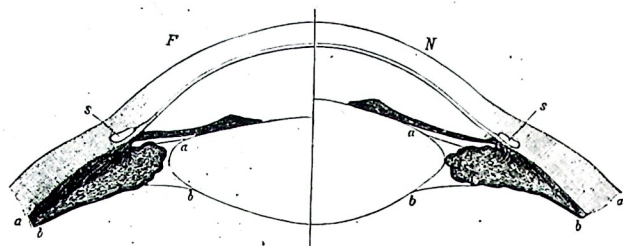


Fig. 11

de espesor, según que supone que el proceso fisiológico no es tan sencillo como suponía Helmholtz. Al contraerse el músculo ciliar se desplazan hacia el cristalino las inserciones ciliares a través de la zónula, especialmente las que van a la primera superficie del cristalino, hasta que en la contracción máxima se llega a relajar totalmente la zónula. Esta contracción lleva consigo un aumento en las curvaturas del cristalino, especialmente en la correspondiente a la primera superficie.

Intervienen acciones antagónicas: por un lado las fuerzas elásticas del cristalino, y por otro la acción muscular, este dispositivo resulta según Gullstrand el más adecuado para proteger el cristalino en variaciones bruscas de acomodación, según puede verse en el modelo mecánico dado en la fig. 12.

El muelle superior representa al cristelino de modo que su acortamiento da la variación de forma al acomodar y su fuerza la elasticidad del cristelino. Al muelle inferior se atribuye la elasticidad de la coroides y la fuerza

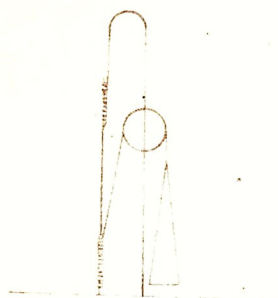


Fig 12

de tracción aplicada es la fuerza con la que se contrae el músculo ciliar. Fácilmente se vé que la tensión del muelle superior ha de ser más pequeña que la del inferior, de tal modo que al estar sin tensión la cuerda que une los dos muelles, la tensión del superior es nula. Fácilmente vemos que cambios bruscos en la fuerza no llegan a ser peligrosos para los dos muelles.

Una serie de medidas experimentales han ayudado a Gullstrand a apoyar su teoría. Los resultados pueden verse en el lugar citado, evitándose con ello el reproducirlos aquí.

d) Teoría de Tscherning.

Tscherning (42) (45) (46) (47) (48), mantiene una teoría totalmente opuesta a las anteriores. Dice, que en el estado de reposo la zónula está relajada en contra de lo previsto por Helmholtz y Gullstrand. Al acomodar se contrae la zónula por el juego de los músculos ciliares, actuando en sentido centrífugo sobre el ecuador del cristalino y produciendo un cambio muy com-

plejo en la forma de la superficie anterior determinado por la constitución interna de la parte central del cristalino, que es menos plástica. La curvatura del cristalino aumenta en su parte central y disminuye en la marginal, hecho que había sido ya encontrado por Young (28).

Apoya su teoría principalmente en la modificación de la aberración esférica durante la acomodación diciendo que varía en el sentido de aumentar la potencia para rayos que pasen por el centro de la pupila respecto de la potencia correspondiente a rayos marginales, es decir que con acomodación el ojo ^{queda} está ~~se~~ subcorregido. Las medidas las hace con el aberroscopio que critica duramente Gullstrand (31), diciendo que mide distorsiones y no aberraciones esféricas, y no solamente esto ha sido criticado por Gullstrand, sino toda la teoría. Con todo no existe todavía ningún hecho experimental que dé la razón a ninguno de ellos, pero como en el fenómeno de la miopía nocturna, juega la acomodación un papel importante, conviene insistir en el punto de partida de la teoría de Tscherning, es decir, en la modificación de la aberración esférica durante la acomodación, ya que sobre este asunto hemos de volver más tarde al dar la interpretación de los hechos observados.

e) Extensión, amplitud y velocidad en la acomodación.

La acomodación tiene unos límites perfectamente determinados, extendiéndose desde el punto más alejado de visión

distinta, "Punctum remotum", hasta el punto más próximo de visión distinta, "punctum proximum". Estos puntos nos definen el recinto de acomodación dentro del cual podemos distinguir los objetos. En la fig. 13, H designa el punto principal del eje, P su punto próximo. La medida de la extensión

de la acomodación se hace en dioptrías definida por:

$$D_A = \frac{1}{HR} - \frac{1}{HP}$$

Este recinto de la acomodación varía con la edad como puede verse en la curva de Donders, ésta en 1876 (fig. 14), es decir tienden a aproximarse los puntos P y R, con la edad, disminuyendo con ella la extensión de la acomodación y dando lugar a la presbicia, cuando el punto próximo se sitúa detrás de la cabeza.

El acto de la acomodación no es instantáneo, exigiendo algún tiempo, que se puede considerar como comprendido entre uno y dos segundos.

6) Aberraciones

La aberración más considerable que aparece en el ojo, es la aberración esférica, que como sabemos es la aberración producida por la formación de la imagen en puntos distintos del eje al variar la altura de incidencia en el ojo. El ojo está subcorregido

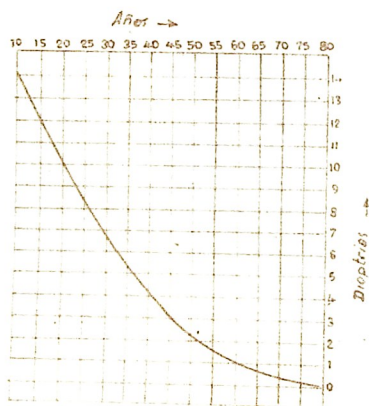


Fig. 14.

do presentando el máximo de aberración en una zona correspondiente a una pupila de unos 3 mm. a partir de la cual la curva que representa la aberración esférica tiende a sobre corregirse. (fig 16). La figura 16 se ha obtenido de la 15 lográndose así una representación gráfica de la aberración esférica por diversas longitudes de onda. El cero de las abscisas corresponde al foco paraxial para

$$\lambda = 585 \text{ m}\mu.$$

En la figura 16 hemos dado también la aberración esférica en centésimas de mm. para las diferentes longitudes de onda y en ellas vemos que no existe acromatía, y esto que pudiera ser un inconveniente desde el punto de vista de la corrección del ojo, tiene la ventaja de dotar al órgano visual de un criterio selectivo cromático. Por efecto de la aberración cromática los rayos violetas forman su imagen delante de la retina, mientras que los rayos rojos la forman detrás. Prescindimos de detalles cronológicos sobre investigaciones cromáticas en el ojo por no ser propio de este lugar.

El estigmatismo que se presenta con mucha frecuencia es debido principalmente a diferencias de curvatura de la córnea, pudiendo existir también debido a irregularidades de curvatura en el cristalino por situación oblicua de éste. Desde

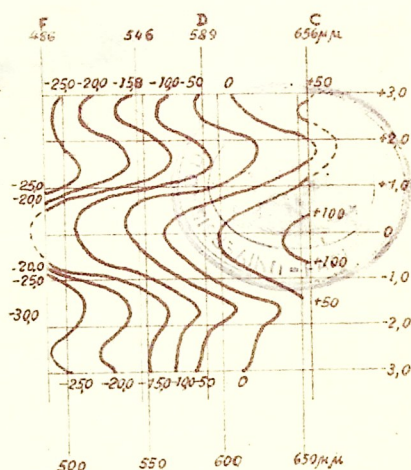


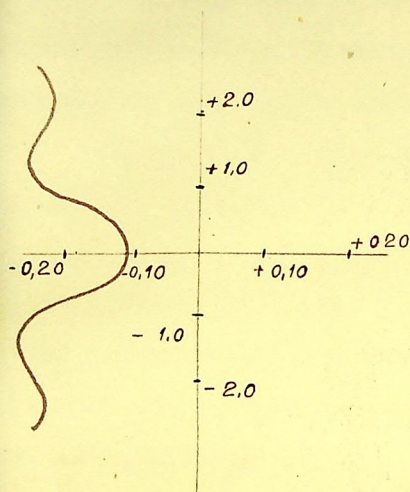
Fig. 15

Curves de Ames y Proctor

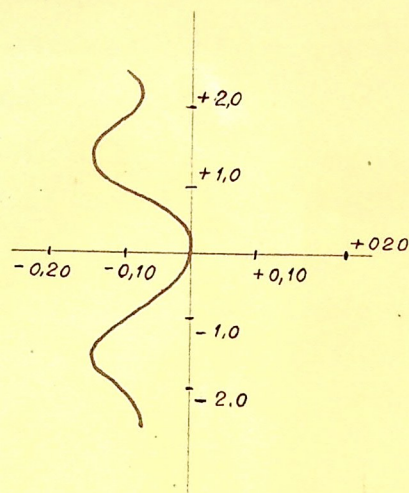
J.O.S.A. 5, 22. 1921

Las cotas dan los valores de la aberración esférica en 0.01 de mm.

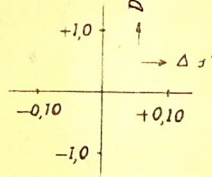
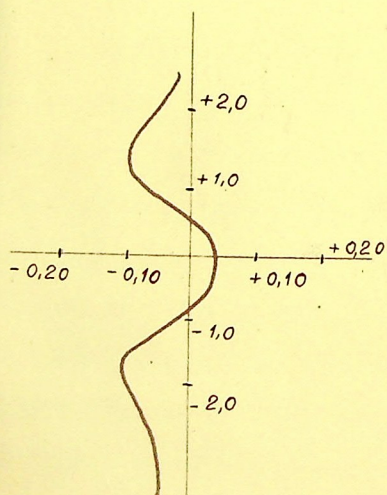
(F) $\lambda = 486,1$



$\lambda = 558 m\mu$



(D) $\lambda = 589,3 m\mu$



(C) $\lambda = 656,5 m\mu$

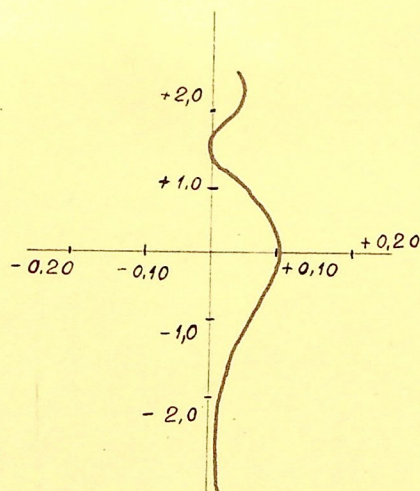


Fig 16.

el punto de vista del estudio que desarrollamos, no presenta el astigmatismo un interés excepcional y por ello no interesa profundizar demasiado en su estudio. Del resto de las aberraciones que pueden presentarse en el ojo, podemos decir lo mismo, dejando por eso su estudio sin tratar en este lugar.

El ojo esquemático de Gullstrand no puede servir para un cálculo trigonométrico de la curva de aberración esférica puesto que no da cuenta ni de las variaciones de índice que, según vimos en la figura 7 tiene el cristalino, ni tampoco la forma exacta de sus superficies. Además presenta el inconveniente de no dar los valores correspondientes a las variaciones de curvaturas e índices de los medios ópticos del ojo para valores de la acomodación intermedia entre el reposo y la acomodación máxima.

C. Modificación de la retina por el estímulo luminoso

Se ha descrito el ojo como instrumento óptico, estudiando la formación de imágenes en la retina, pero falta la explicación del mecanismo de transmisión al cerebro, es decir, la transformación de imagen en sensación. Sabemos, por haber descrito la constitución de la retina, que los terminales nerviosos son los centros de transmisión, pero nos falta por conocer el modo y manera de este paso. La solución se presenta extraordinariamente dificultosa a la experimentación y no es de este lugar, ya que pertenece al dominio de la óptica fisiológica. Pero sí podemos tratar, por ser necesario para razona-

mientos ulteriores, de las transformaciones que la luz verifica en la retina. Esta transformación no solo influye en el acto de la percepción, sino en el de la adaptación del ojo a las diferentes luminosidades. Podemos dividir los fenómenos en dos grupos, los físicos y los químicos. Entre los primeros se encuentran la expansión y retracción del epitelio pigmentado a consecuencia de la fuerza llamada retinomotriz cuyo estudio detallado puede verse en el libro de V. Studnitz (49). Entre los físicos se encuentran también los fenómenos eléctricos, que podemos resumir con Magitot (50), citando los más importantes:

1º En la retina existe una fuerza electromotriz cuya aparición coincide con el desarrollo de las células visuales.

2º Todos los tonos espectrales modifican el potencial, actuando en la proporción de su luminosidad. Una retina adaptada a la luz, reacciona al máximo en el verde-amarillo, y una retina en la obscuridad en el verde-azul. Estos tonos corresponden al máximo de sensibilidad para la visión diurna y para la visión crepuscular respectivamente.

Esta medida experimental de técnicas delicadas cuya descripción puede verse en Adrian y Matthews (51), Granit (52) y V. Studnitz (49), nos permite establecer una relación entre la excitación luminosa y los fenómenos eléctricos en la retina, cuya aparición constituye la modificación electro-motriz de los nervios ópticos.

Los fenómenos foto-químicos tienen gran importancia, y entre éstos los de la decoloración de las sustancias visuales, son los que más pueden interesar en este trabajo.

En el extremo de los bastones, y sólo en ellos, existe una substancia de color rojo llamada púrpura, cuyo estudio detallado puede verse en V. Studnitz (49). Por la acción de la luz se oxida, decolorándose, como se demostró sometiendo una rana a una iluminación muy intensa, poniendo entre el foco y el ojo una rejilla cuya imagen en forma de trazos rojos y cuadrados blancos, se encontró en la retina al empujar rápidamente el ojo y abrirlo. El estudio de la dependencia entre la decoloración y la longitud de onda demuestra que el infrarrojo no tiene acción alguna sobre la púrpura, y en cambio, en el ultravioleta aparecen fenómenos de fluorescencia. Por estar la púrpura en los bastones, y ser éstos los que de un modo preferente intervienen en la visión crepuscular, se ha querido interpretar la púrpura como la substancia típica de la visión con bajas luminosidades. En efecto, superponiendo la curva de decoloración y la de la sensibilidad del ojo adaptado a la obscuridad (curva de Wald), encontramos una concordancia extraordinaria entre ambas. (fig 17). Esta razón ha constituido un argumento para asignar a los bastones y a la púrpura una función preponderante en la visión con bajas luminosidades, dando lugar a la teoría de la duplicidad, que explicaremos más tarde.

Viene a apoyar más esta teoría, el descubrimiento de V. Studnitz (49), de una substancia que se encuentra en los conos y que al principio llamó substancia de los conos (Zapfen-substanz), y más tarde azul-visual (Sehblau) a la que hay que asignar para la visión diurna una función análoga a la que la púrpura

pura tiene en la visión crepuscular, ya que la curva de absor-

ción presenta una concordancia casi perfecta en la curva de sensibilidad diurna (fig 18).

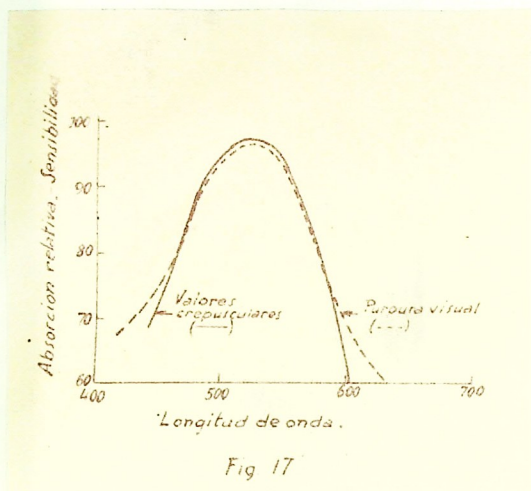


Fig 17

Esta modificación de la retina a consecuencia de la acción de la luz, es recogida por los terminales nerviosos de la retina, pesándose ya al cerebro en donde se convierte en sensación, perteneciendo ya esto a la psi-

cología de la visión, cuyo estudio no es de este lugar.

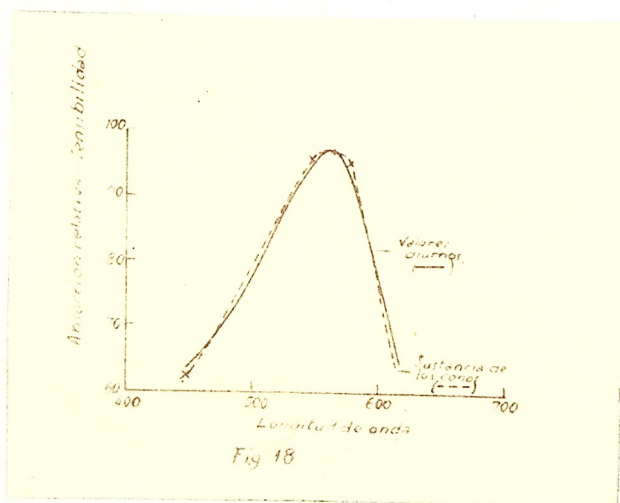


Fig 18

III. LA VISION.

A. Agudeza visual.

El estudio biológico de la fisiología de la visión nos enseña que la agudeza visual o el poder separador del ojo crece con el número de células sensoriales existentes en la retina por unidad de superficie, siempre que estas células estén unidas individualmente al ganglio transmisor del estímulo. Si así no fuese, es decir, si al mismo ganglio se uniesen varias células, disminuiría, por unidad de superficie, el número de ellas capaces de intervenir de modo distinto en la visión, perdiéndose por tanto en agudeza visual. En la figura 19 vemos explicado de un modo claro todo lo que acabamos de decir.

Con arreglo a esto sería de esperar que la agudeza visual medida como finura del mosaico de células retinianas hubiera de coincidir con la agudeza visual medida con ojo desnudo, con el criterio de mínimo separable, y en efecto así ha sido ya que se ha encontrado que el ángulo visual mínimo medido como separación del mosaico retiniano es de $18',5 - 74''$, mientras que el ángulo correspondiente al mínimo separable es de $23',3 - 64''$.

Por medidas experimentales como señala la figura 20 se vé que la agudeza visual aumenta con la intensidad luminosa del estímulo. Este hecho, cuya explicación biológica no parece haberse dado hasta ahora de un modo satisfac-

- L rayos de luz
 Z células sensibles a la luz
 N nervios transmisores
 G ganglios
 Sch células de unión.

Esta figura está tomada del libro de v. Studnitz "Physiologie des Sehens".

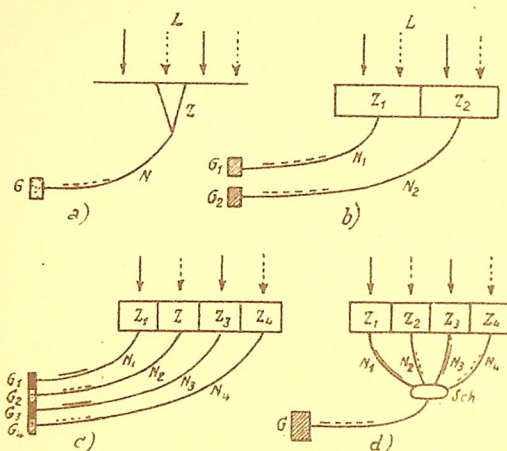
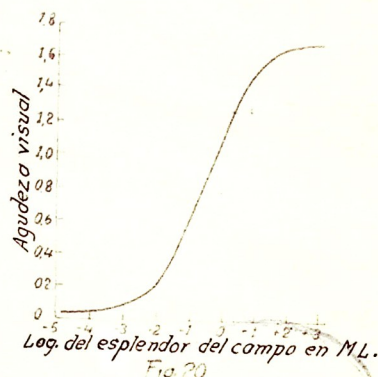


Fig. 19

- Solo un rayo encuentra la célula y por lo tanto será el único que intervenga en la sensación.
- Los cuatro rayos inciden sobre dos células. La excitación resultante que percibe el ganglio es la correspondiente a los dos rayos que inciden sobre la misma célula.
- Cada rayo de luz excita una célula. La imagen de los cuatro rayos se formará completamente.
- Cada uno de los cuatro rayos excita una célula, pero como éstas estén unidas a una común, en lugar de cuatro puntos luminosos, solo se percibirá uno cuatro veces más intenso.

torio, ha provocado numerosos estudios. Se ha querido relacionar los esplendores con la agudeza visual, habiéndose dado para ello diferentes leyes, entre las que se destacan por su importancia las de Riccó y Piper. La ley de Riccó (11) comprobada por Charpentier (53), Asher (54), Loeser (55) y Abney (56) dice que el umbral del esplendor, B , entendiendo por esplendor de una su-



perficie en una cierta dirección, el cociente de la intensidad luminosa de la superficie en dicha dirección y de la proyección del area sobre el plano normal a la misma, y el ángulo bajo el cual se vé el objeto, σ , están relacionados por la ley:

$$\sigma \sqrt{B} = \text{constante cuando varía } \sigma$$

El umbral de esplendor será el esplendor mínimo para el cual se distingue el objeto.

La ley de Riccó ha sido sometida ultimamente a nuevos estudios, destacándose entre ellos el de Kíhl (57) que, desde un punto de vista teórico y utilizando medidas de otros autores (Siedentopf, Hoppe, etc) plantea el problema general de una teoría del sentido visual. Enfocando el problema experimentalmente lo aborda Schönwald (58) que llega a la conclusión de que la ley de Riccó es válida para pequeños ángulos visuales y un esplendor del campo circundante de 10^{-8} a 2 sb. El ángulo limite para el cual es válida la ley varía desde 20 minutos para el ojo adaptado a la oscuridad a 0,4 minutos para el ojo adaptado a la claridad, y si se estudia la variación de la inversa de di-

cho ángulo con el esplendor del campo circundante se encuentra de modo muy aproximado a la curva que expresa la dependencia entre la agudeza visual y dicho esplendor.

Piper (12) encuentra para superficies cuadradas de lado 2° a 20° que la ley que se cumple es: $\sigma B = \text{constante}$; esta ley la confirmaron Gelhoff y Söhnering (59) para la visión diurna, mientras que para la visión crepuscular encuentra que: $\sigma^2 B = \text{constante}$, es decir la ley de Riccò,

Con esta ley no está de acuerdo Kühl (60), quien propone para la agudeza visual en relación con la iluminación I las siguientes: (61)

$$\text{agudeza visual diurna} = 0,470 + 0,523 \log I$$

$$\text{agudeza visual nocturna} = 0,351 I^{\frac{1}{2}}$$

En todas estas fórmulas intervienen la distancia del objeto de un modo implícito, puesto que de ella y del tamaño del objeto depende el valor de σ . Freeman (62), la introduce explícitamente, proponiendo la ley:

$$\log A = 4,89261 - 0,00076 s - (0,39 + 0,001s) \log I$$

siendo A el área del objeto, I su iluminación y s la distancia a la que se encuentra.

Investigando la agudeza visual en relación con la distancia al estímulo, ha encontrado Freeman (63) que la agudeza visual medida como mínimo visible, es mayor para un estímulo situado a 300 cm., que cuando se le aproxima a 30, sin que esta incongruencia anómala se deba atribuir a factores subjetivos como magnitud aparente, falta de conocimiento de la

distancia actual del estímulo, diferencia de apertura de la pupila o diferencia de espesor lenticular a causa de la acomodación, etc. Freeman dice que el fenómeno no es restringido puesto que se presenta con adaptación a la luz y con adaptación a la obscuridad. Frente a estas afirmaciones de Freeman ponemos las medidas realizadas, dadas en el capítulo correspondiente de esta memoria en el que, como veremos, encontramos que la agudeza visual tiene variaciones extraordinarias con la distancia del estímulo, pero dependiendo de la intensidad luminosa. Sobre el mismo tema han tratado Luckiesh y Moss (64) ampliando las conclusiones de Freeman y utilizando un nuevo modelo de test, sin que digan nada nuevo respecto de los anteriores.

La diferente longitud de onda influye en la agudeza visual como se ha demostrado en los trabajos de Arndt (65) y de Klein (66) en el de Arndt y Dresler (67), que estudia comparativamente Schneider (68) para explicar las diferencias aparentes que existen en sus resultados, lo mismo que en los trabajos que sobre este tema han hecho Luckiesh y Moss (69), (70) y (71). Se ha encontrado un aumento de la agudeza visual con la luz de sodio, existiendo, sin embargo, discordancias sobre las ventajas de dicha luz, o de la lámpara de vapor de mercurio. En 1936 Schober y Jung (72) han tratado de explicar este resultado con un estudio sobre las causas de la diferente agudeza visual con distinta iluminación. Más tarde se han realizado por Schober y Wittmann (73) medidas que comprueban los resultados teóricos obtenidos. Diferentes autores han continuado con el mismo tema, haciendo alguno de ellos aplicaciones técnicas. Schober y Jung en el trabajo ya citado, hacen un

estudio teórico detenido del problema utilizando medidas experimentales de otros autores. Partiendo de la teoría de la difracción de sistemas ópticos estudiada por Picht (74) y aplicada al ojo, llegan a la conclusión de la existencia de una variación de la agudeza visual con la longitud de onda y el diámetro de la pupila, de tal modo que para pupilas pequeñas de diámetro 1 mm. la agudeza visual máxima se encuentra en los 5.500 Å° E, mientras que para pupilas de 6 mm. el máximo se desplaza a 5.740 Å° E. Encuentran también que la aberración esférica tiene una influencia escasa en la variación de la agudeza visual. Con esto puede explicar perfectamente las variaciones observadas con la luz de sodio o con la lámpara de mercurio.

Las medidas de Schober y Wittmann (73) las utiliza Kühl (75) para tratar de explicar la variación que la agudeza visual produce en la iluminación, haciendo para ello un estudio detallado del mosaico retiniano. Para grandes iluminaciones se llega a la sensibilidad de contraste de un cono que presenta su valor absoluto máximo para un esplendor de valor aproximado 0,1 stb.; este máximo absoluto corresponde a un ángulo visual de conos de $40''$. Con todo, esta teoría de Kühl no satisface por completo las exigencias biológicas y físicas, y por ello, como hemos dicho al principio, no existe una teoría plenamente satisfactoria sobre la agudeza visual.

B) Influencia de la luminosidad del estímulo y de la incidencia de los rayos

1) Adaptación

Podemos definir la adaptación como el estado de equilibrio óptico entre la luz que excita los órganos visuales y el organismo, interviniendo factores no solo de orden físico sino psíquico y fisiológico. Hay que distinguir la adaptación a la oscuridad y la adaptación a la luz, que por ser contrerías, exigen al ojo un comportamiento distinto. De todos modos podemos hablar de adaptación en general estableciendo más tarde las diferencias que existen entre las distintas visiones. El tiempo necesario para llegar a establecer el equilibrio y adaptarse por tanto el ojo a una cierta luminosidad, es variable y depende no solo de factores subjetivos, sino de otros de orden fisiológico como la púrpura. No es éste el momento más indicado para el estudio fisiológico o psicológico de estos problemas, pero sí importa señalar; porque de ello haremos uso más tarde, que el tiempo necesario para una adaptación completa para la oscuridad, es del orden de 10 a 30 minutos, pudiendo aceptarse sin gran error que después de 30 minutos en un cuarto oscuro, está el ojo completamente adaptado a la oscuridad.

2) Visión crepuscular y fenómeno de Purkinje

La teoría de la duplicidad establecida por Parinaud y v. Kries asigna funciones distintas a los órganos receptores existentes en la retina; así a los conos les está encomendada según ella la visión diurna, mientras que los bastones tienen que cumplir su cometido en la visión con bajas luminosidades. Como apoyo de esta teoría se han encontrado numerosos fenómenos que la confirman, destacándose entre ellos el fenómeno de Purkinje, que por ser importante en el estudio de las causas de la miopía nocturna, conviene describir. Entendemos por fenómeno de Purkinje (76) el hecho de la influencia del grado de iluminación sobre la sensibilidad cromática del ojo. Al disminuir el esplendor del objeto los rayos de longitud de onda mas corta ganan en claridad relativa, mientras que los de longitud de onda mayor la pierden. El mismo Purkinje describe los colores en las primeras luces del amanecer diciendo que al principio, cuando la luz es apenas perceptible solo se vé negro y gris, apareciendo los colores vivos como el rojo y el verde casi como negros. Durante mucho tiempo el amarillo no pueda distinguirse apenas del rosáceo, siendo el primero que aparece el azul. Este fenómeno observado tambien y descrito por Abney, Dove y Hering, tiene una importancia grande en la visión con bajas luminosidades.

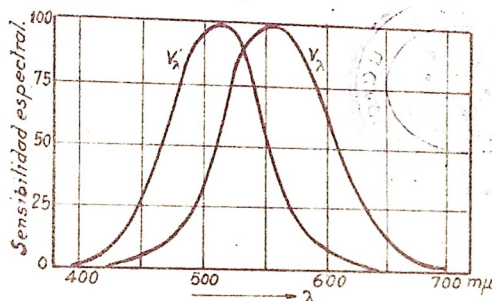
El comportamiento diferente del ojo en plena luz y en crepúsculo apoya la teoría de la duplicidad. En estos dos tipos de visión existen diferencias perfectamente acusadas,

puediendo decirse que la crepuscular se caracteriza por los hechos siguientes: Percepción mínima para los colores, disminución de la agudeza visual, corrimiento de la sensibilidad espectral relativa hacia las longitudes de onda menores, (fig. 21), aumento del

campo visual y una mayor agudeza para la visión periférica. La teoría de la duplicidad, cuyo fundamento fisiológico es indudable, ha permitido explicar muchos fenómenos y ha sido confirmada por nu-

merosos experimentos. Conviene señalar, sin embargo, que la separación entre la visión foveal y la extrafoveal no tiene unos límites tan acusados como algunos pretenden, existiendo una zona intermedia en la cual se superponen las dos visiones como indica la tabla siguiente. En ella vemos que la frontera no presenta un corte brusco, y a ésto hay que añadir que las variaciones de individuo a individuo y con la edad son capaces de alterarla. Esto por lo que a la zona intermedia se refiere, ya que para los extremos es siempre válido lo que en ella se expone, prescindiendo siempre de aquellos estados patológicos que puedan modificarla esencialmente.

Fig. 21.



Esplendor del campo

Clase de visión

Por debajo de 0,01 asb. hasta 10^{-6} asb.

Visión crepuscular propiamente dicha. No se perciben colores

Para 0,001 asb.

Límite inferior del fenómeno de Purkinje.

De 0,01 a 100 asb.

De 12 a 14 asb.

De 50 - 60 asb.

Límite superior del fenómeno de Purkinje para 3° de excentricidad y un campo de $1^{\circ}24'$.

Límite superior del fenómeno de Purkinje para 35° de excentricidad y un campo de $1^{\circ}30'$.

Para la visión crepuscular o visión diurna. Inconstancia de los esplendores cromáticos menos en la fovea en donde existe constancia hasta el valor umbral

De 100 asb hasta el deslumbramiento (106)

Visión diurna propiamente dicha.

3. Contraste e irradiación

El contraste es la sensibilidad diferencial estática que nos permite discriminar diferencias de esplendor. Con arreglo a esta definición necesitamos que existan variaciones en la iluminación, en el color, en la forma etc, del objeto, ya que para una situación aislada no existe contraste sino solamente irradiación y difusión. El efecto de contraste no puede nacer nada mas que de la coexistencia de sensaciones. Así vemos que un cuadrado de color gris colocado sobre una serie de fondos de albedo decreciente del blanco al negro, constituyen

por efecto de contraste, una escala graduada de un gris oscuro a un gris claro.

Contraste e irradiación, fenómenos suficientemente conocidos, se encuentran descritos en muchos libros, citando entre otros la "Physiologische Optik" de A. König y la obra de Helmholtz sobre óptica fisiológica, tantas veces utilizada; por ello no insistimos en su estudio, pero no queremos dejar de señalar que el contraste tiene una importancia grande en la visión crepuscular, dando lugar a variaciones en los umbrales de percepción.

La relación existente entre la luminosidad del estímulo de fondo y el incremento mínimo apreciable que constituye el umbral diferencial, ha dado lugar a numerosos estudios, contándose entre los primeros sobre el tema los realizados por Weber y por Fechner, que han dado lugar a la ley que lleva su nombre y que podemos enunciar diciendo que la razón del incremento mínimo perceptible, a la luminosidad del estímulo, es constante. Estudios posteriores de Aubert, König y Brodhun han señalado desviaciones de la ley para altas y bajas luminosidades.

Sobre el estudio de umbrales diferenciales existe una copiosa literatura en cuyo detalle no debemos entrar para no abandonar la línea de nuestro problema.

4. Fenómeno de Aubert-Förster.

Aubert y Förster (77) idearon el siguiente experimento cuyas conclusiones dieron lugar al fenómeno que lleva su nombre.

Hacían saltar una chispa eléctrica que iluminaba debilmente una pantalla sobre la que se colocaban diversas letras y caracteres que habian de ser reconocidos por el observador. Presentando objetos de distinto tamaño y a diferentes distancias de modo que los ángulos subtendidos por ellos fueran siempre los mismos, encontraron una ley que enunciaron diciendo que en visión indirecta es mayor la agudeza visual para objetos cercanos que para los lejanos, siempre que el ángulo bajo el cual se vean los objetos sea el mismo.

El fenómeno de Aubert-Förster, cuya explicación no ha llegado a darse todavía de un modo concreto, coincidiendo los autores que sobre él han tratado en darle origen psicológico, ha motivado estudios como el de Kaila (78) que, por entrar de lleno en dicho terreno, se salen fuera del marco de la presente memoria.

5. Efecto Stiles-Crawford.

La determinación de la relación existente entre la sensibilidad del ojo para la luz y la altura de incidencia del rayo en la pupila ha sido hallada por Stiles y Crawford (79), encontrando que la luz es tanto mas activa cuanto mas paraxial sea su incidencia. Mas tarde encontró Stiles (80) que el tono cromático de una luz espectral depende tambien de la zona de incidencia en la pupila del ojo, encontrando últimamente (81) que todo lo anterior puede referirse a los diferentes ángulos bajo los cuales inciden los rayos de luz sobre la fovea. El fenómeno de Stiles-Crawford, cuyas causas son aun muy oscuras,

tiene una importancia grande para fotometría cuando la pupila de salida del instrumento fotométrico es muy estrecha (p. ej. Fotómetro de Pulfrich usado a bajas luminosidades), ya que en ese caso cualquier descentramiento del haz sobre la pupila del ojo hace variar grandemente el equilibrio fotométrico.

En instrumentos de observación nocturna que utilizan pupilas de salida de diámetro aproximadamente igual al de la pupila del ojo, tiene el fenómeno menos importancia, si bien su existencia explica el por qué los rendimientos fotométricos no crecen con las áreas de las pupilas de salida, sino mas lentamente, como hubiera sido de esperar desde un punto de vista estrictamente geométrico. Estudios hechos por nosotros sobre este tema confirman la hipótesis anterior.

Como se verá en la descripción de las medidas experimentales se ha tenido en cuenta el fenómeno de Stiles-Crawford usando ~~los~~ dispositivos de fijación de la pupila.

6. Visión periférica.

Al hablar anteriormente del campo visual hemos señalado que sólo en una zona central existe una visión nítida, esfumándose la imagen a medida que nos acercamos al borde. Moviendo un objeto de color puesto sobre un fondo gris de modo que vaya en la dirección del borde del campo, vemos que en aquel no tenemos sensación cromática ninguna. Si recordamos la constitución de la retina y la teoría de la duplicidad tenemos que asignar a los bastones la misión receptora en la visión periférica, que

es extrafoveal. No es de extrañar por eso que se presenten analogías entre la visión periférica y la visión crepuscular.

C. VISION CROMATICA.

El órgano visual tiene una sensibilidad diferente al variar la longitud de onda que lo excita. Ya hemos visto anteriormente que la agudeza visual depende en gran parte del color de la luz que ilumina al objeto. Pero como ésta no es nunca, mas que en casos excepcionales, rigurosamente monocromática, intervendrán las diversas longitudes, que es el caso que se presenta normalmente. El ojo tiene una absorción selectiva que le permite eludir la acción de la aberración cromática, que, como vimos en el capítulo correspondiente, es bastante considerable. Esta absorción se distribuye como indica la tabla dada en la página.

Como el ojo tiene un comportamiento distinto en visión diurna y en visión crepuscular, la sensibilidad espectral máximas es también diferente, según se indicó ya en la figura 21.

En la región comprendida entre la adaptación a la claridad y la visión crepuscular se va pasando por una zona intermedia en la que la sensibilidad se refiere, y allí aparece el fenómeno de Purkinje, según el cual el azul y el verde aparecen relativamente mas brillantes que el rojo.

Las teorías de la visión cromática, entre las que

destaca por su importancia la de Young y Helmholtz, que se encuentra desarrollada en el tomo II de la *Optica Fisiológica* del segundo autor (44), se apoya en una teoría de tres colores, mientras que la de Hering (82) utiliza cuatro colores fundamentales para construirla. Ninguna de las dos es suficiente para explicar totalmente la visión cromática, habiendo existido ya intentos por Aubert y Donders para combinar las dos, sin que estos autores, ni posteriormente v. Kries lo hayan logrado. No es de este lugar el hacer el estudio a fondo de la cuestión cromática remitiéndonos para ello a los libros ya citados de Helmholtz y de Hering o al de Trendelenburg (83), pudiendo encontrarse un buen resumen en la obra de Richter (84), que puede servir para una orientación en la teoría de la visión cromática.

La iluminación cromática varía la sensibilidad del órgano visual dando lugar a la adaptación que por la causa se llama cromática, a la que el ojo llega rápidamente ya que después de segundo y medio de contemplar un campo cromático se le puede considerar como adaptado a él.

El estudio completo de la visión cromática constituye un tema sugestivo de estudio en el que no podemos entrar a fondo por salirse del marco del presente trabajo.

LONGITUD DE ONDACOMPORTAMIENTO DEL SISTEMA OCULAR

Inferior a 313 m μ .

La córnea absorbe la totalidad de la luz incidente.

De 313 a 375 m μ .

Solamente en edades juveniles llega la luz a la retina, mientras que en las personas de edad se absorbe fuertemente por el cristalino.

De 375 a 390 m μ .

Se absorbe parte por el cristalino, parte se pierde por fluorescencia y parte llega a la retina en donde se percibe el color violeta.

De 390 a 750 m μ .

Región visible.

De 750 a 1500 m μ .

Se absorbe principalmente por el cristalino.

Por encima de 1500 m μ . Se absorbe totalmente por la córnea y por las partes primeras del ojo.

IV. MIOPIA NOCTURNA

A. Medidas realizadas.

Una vez descubierto el fenómeno era necesario confirmarlo mediante medidas siguiendo una técnica operatoria tal que todos los factores anteriormente citados, menos el de la acomodación, no tuviesen variación alguna durante las medidas. Los fisiológicos se mantienen en las mismas condiciones, teniendo al observador durante treinta minutos en la cámara obscura antes de hacer la lectura, para que estuviese adaptada a la oscuridad. Para evitar la influencia de lecturas anteriores, y para que el observador no pasase por fenómenos de deslumbremiento, no era el mismo el que hacía la lectura de los ángulos de cruzamiento de los nicoles, sino otro observador. Los factores físicos y los geométricos se mantenían constantes al serlo la iluminación, y por el empleo del mismo anteojo para las lecturas; pero, como había que desplazar el ocular para obligar al observador a la acomodación, se han medido las pupilas de salida y los aumentos en los diversos momentos, habiéndose obtenido una constancia de dichos factores. El aparato que reúne mejores condiciones para nuestro objeto es el Diafanómetro I.N.D.O., haciendo las modificaciones que detallamos al describirlo.

Las figuras 22 y 23 nos dan una sección esquemática del diafanómetro, cuyo funcionamiento es el siguiente: una lámpara (1) eléctrica de incandescencia nos sirve de fuen-

te luminosa. El diafragma intercambiable (2) está colocado de modo que su orificio coincida con el foco de la lente (3), obteniéndose así una luz de rayos paralelos que atraviesa un nicol (4), que puede girar respecto del (4'), mediante el tornillo (5), y cuyos giros pueden leerse en el círculo (10), iluminado por la lámpara (9), utilizando el ocular (8). El haz paralelo es recogido por la lente (13), en cuyo foco se encuentra un vidrio deslustrado (11) y, a poca distancia de él, un retículo cuya forma es la dada en la figura 24. Un objetivo (14) (fig. 22) en cuyo plano focal se encuentra el test envía un haz paralelo al espejo negro (26), y por nueva reflexión en el (26') podemos observar la imagen mediante el anteojo patrón de 25-24, cuyas características están calculadas para obtener el óptimo rendimiento fotométrico. El ϵ se han

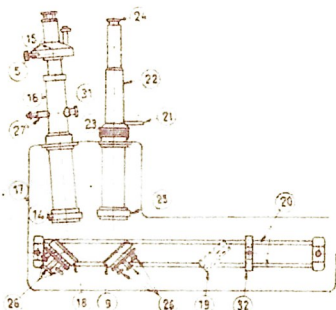


Fig. 22

determinado las ~~sposiciones~~ del ocular correspondientes a las dioptrías. (*) En cada una de ellas hemos hecho diez medidas, cuyo promedio se ha utilizado para obtener los puntos de la curva. Con el fotómetro de Pulfricht se ha determinado el esplendor del test para la posición de los ni-

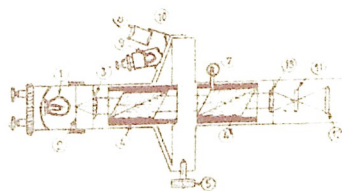


Fig. 23

Detalle del sistema de iluminación

(*) Así logramos, por un desplazamiento de ocular, obligar al ojo a una acomodación

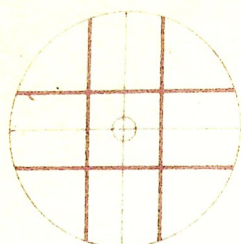


Fig. 24

coles sin cruzar, y con ella han obtenido los correspondientes a los diversos ángulos mediante la fórmula $B_d = B_{90} \cdot \sin^2 \alpha$

Como se ha indicado anteriormente, se ha mantenido la constancia de la iluminación,

midiendo la intensidad y la diferencia de potencial en el circuito de iluminación mediante un amperímetro y un voltímetro respectivamente. En cada una de las posiciones se ha medido el diámetro de la pupila de salida mediante el dinamómetro Askania, encontrando valores constantes en todas las posiciones.

La determinación de las intensidades de luz se ha hecho cuando deja de verse la cruz central del retículo, que es la de trazos mas finos, puesto que, utilizando los trazos gruesos, se encuentran valores que se diferencian mucho entre sí, y el procedimiento pudiera conducir a error.

Con la técnica ya descrita, hemos obtenido los siguientes valores para seis observadores distintos, y correspondiendo cada valor a un promedio de diez medidas:

Tabla n° 1

dioptrías	Observador n° 1	Observador n° 2	
	Esplendor en asb.	Dioptrías	Esplendor en asb.
0	0,026	0	0,055
-1	0,021	-1	0,024
-2	0,021	-2	0,014
-3	0,041	-3	0,024
-4	0,107	-4	0,049
-5	0,181	-5	0,099

Observador n° 3

Dioptrías	Esplendor en asb
0	0,151
-1	0,021
-2	0,001
-3	0,053
-4	0,014
-5	0,045

Observador n° 4

Dioptrías	Esplendor en asb.
0	0,053
-1	0,025
-2	0,021
-3	0,041
-4	0,096
-5	0,182

Observador n° 5

Dioptrías	Esplendor en asb.
0	0,062
-1	0,024
-2	0,018
-3	0,025
-4	0,053
-5	0,101

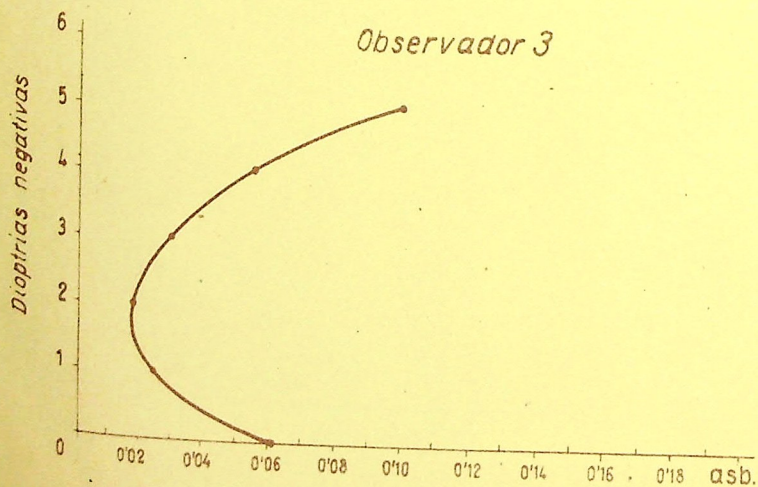
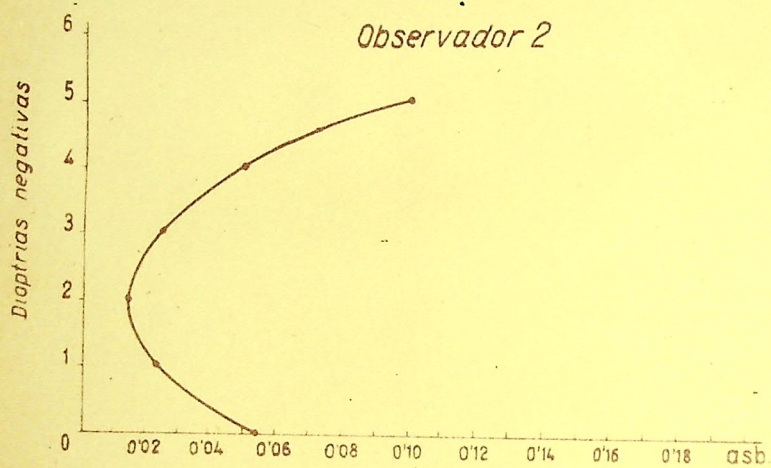
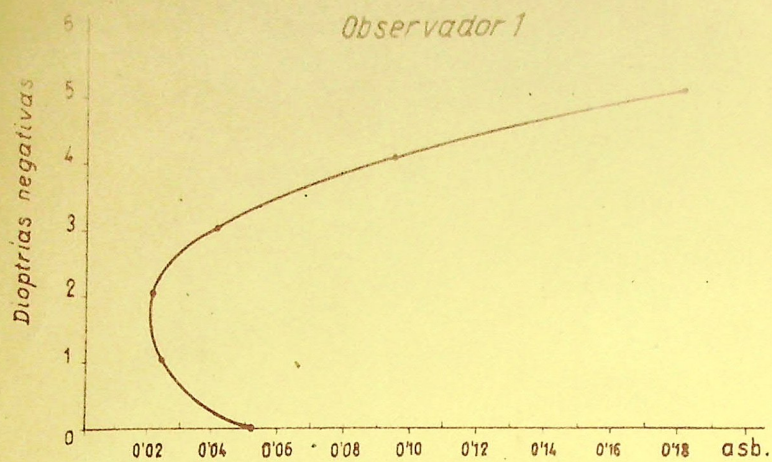
Observador n° 6

Dioptrías	Esplendor en asb.
0	0,048
-1	0,025
-2	0,017
-3	0,019
-4	0,028
-5	0,039

Con estos valores se han dibujado las curvas dadas en las figuras 25 y 26.

Se pensó al principio en atribuir la causa de la miopía nocturna a la aberración esférica del ojo pensando en las grandes aperturas que tiene en bajas luminosidades y para comprobar esta hipótesis pensamos realizar unas medidas con ojos estropinizados, es decir, con pupila completamente dilatada y con sus mecanismos acomodativos completamente relajados.

La técnica empleada vá indicada en la figura 27 . Los tests⁽¹⁾ montados en revólver^(fig. 27 bis) y que tienen la forma indicada en la figura 28 cuya constante de rayado es variable para sub- tender diversos ángulos, están situados en el plano focal de



un objetivo, formando
de un colimador.

El test está il-
luminado ^{de} ~~por~~ un vidrio
deslustrado que difun-
de la luz de una lám-
para de incandescencia
cuyo consumo está re-
gulado y se mantiene
rigurosamente constan-

Fig 27

te.

El sistema de iluminación puede alejarse del test con
objeto de obtener sobre él iluminaciones variables.

Delante del colimador 1-2 se colocó un anteojo (4) per-
fectamente corregido y con una pupila de salida de 8,6 mm.

El ocular del anteojo (5) puede moverse y leerse su enfoque
en la escala (6). El centrado de la pupila del ojo sobre la
de salida, importante para evitar el fenómeno de Stiles Craw-
ford, se aseguró mediante una mentonera (7).

Atropinizados tres pacientes, se les hizo observar
un test enfocando el anteojo lo más finamente posible y ano-
tando la graduación, siendo el esplendor del test de 30 asb.
Se fueron cambiando estos reduciendo su constancia hasta no
distinguir una dirección de trazos y se repitió la operación
de 0,2 en 0,2, dioptrías, hasta 3 dioptrías por encima y por
debajo del primer valor escogido.

El valor de la agudeza visual máxima difirió únicamen-

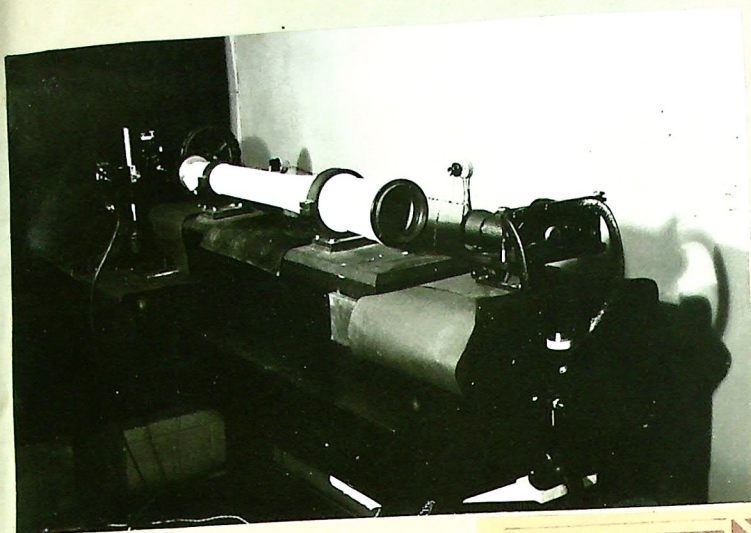


Fig. 27 bis

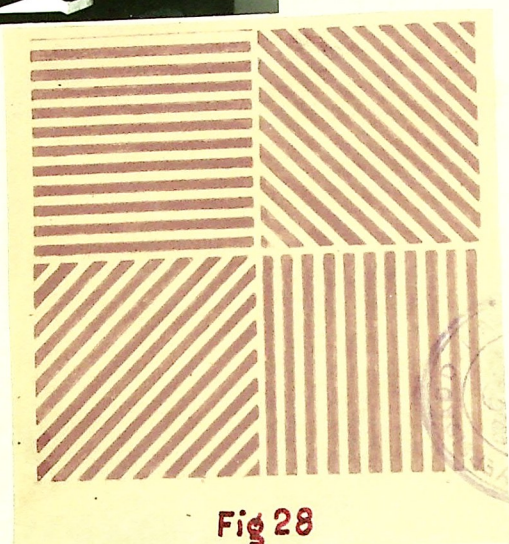


Fig 28

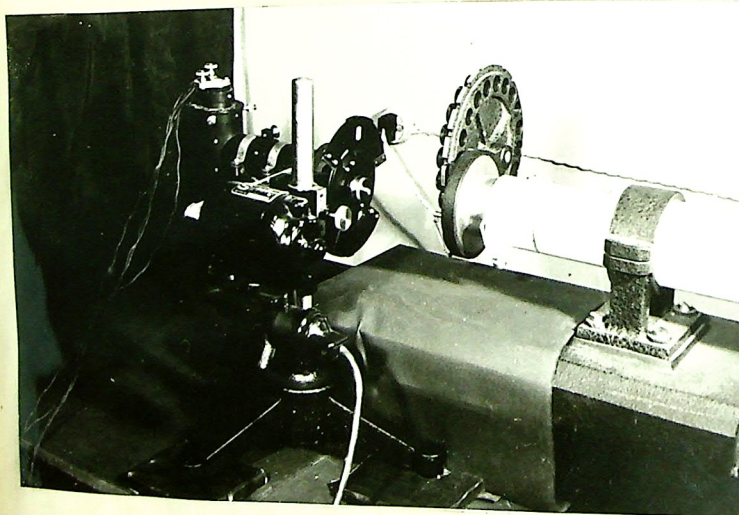


Fig 27 bis (Detalle).

te en $1/2$ dioptrías en dos de los observadores, con el determinado previamente con el ojo en condiciones normales, y en el tercero era aún inferior.

Dadas las condiciones de perturbación en que queda el ojo inmediatamente después de la instilación de miótrícos se repitieron las medidas veinticuatro horas más tarde, en las que el ojo tenía la pupila de igual tamaño y ninguna facultad acomodativa, obteniéndose resultados sensiblemente iguales.

El hecho de no interesarnos para nuestro objeto medidas zonales, sino más bien la aberración promedio (variación del plano de proyección) nos indujeron a repetir la experiencia del esquema de la figura 27 para diferentes tamaños de pupila colocando lo más cerca posible del ojo una serie de diafragmas de diámetros variables desde 1 a 8 mm. Las variaciones de iluminación que habría de sufrir la retina por estas pupilas artificiales se compensaba moviendo el sistema de iluminación (3) sobre la escala indicada en la figura.

Las medidas se realizaron para el ojo, con y sin astropina, estando los resultados recopilados en las curvas de la figura 29.

En ellos no se han representado los valores correspondientes al observador nº 1 ya que éste, por presentar curvas de carácter análogo a las del nº 3, no introduce novedad alguna.

TABLA II

Ojo normal

Diámetro de la pupila

	Dioptrias		
	Obs. 1	Obs. 2	Obs. 3
1	-0,78	-1,00	-0,80
2	-1,09	-1,52	-1,02
3	-0,72	-1,24	-0,74
4	-0,43	-1,11	-0,46
5	-0,45	-1,12	-0,48
6	-0,46	-1,09	-0,49
7	-0,46	-0,68	-0,48
8			

Ojo con atropina instilada momentos antes

Diámetro de la pupila

Dioptrias

	Obs. 1	Obs. 2	Obs. 3
1	+0,61	-0,51	+0,65
2	+0,44	-0,49	+0,49
3	+0,25	-0,52	+0,31
4	+0,46	-0,53	+0,51
5	+0,43	-0,85	+0,49
6	+0,00	+1,21	+0,05
7	-0,04	-1,18	+0,01
8	+0,03	-1,02	+0,11

Ojo con atropina instilada 24 horas antes

Diámetro de la pupila

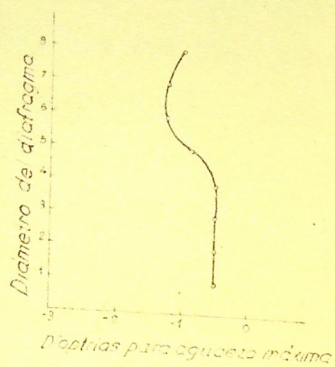
Dioptrias

	Obs. 1	Obs. 2	Obs. 3
1	+0,36	-0,051	+0,33
2	+0,35	-0,50	+0,35
3	+0,34	+0,52	+0,30
4	-0,19	-0,76	-0,21
5	-0,36	-0,75	-0,39
6	-0,04	-0,76	+0,00
7	+0,25	-0,77	+0,31
8	+0,44	-1,01	+0,52

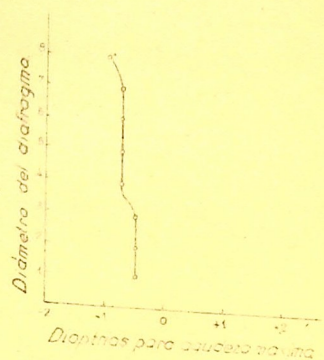
En las curvas obtenidas para ojos normales, puede observarse que, de acuerdo con la curva deducida de los traba-

Observador 2

Ojo con atropina instilada
momentos antes



Ojo con atropina instilada
24 horas antes



Observador 3

Ojo con atropina instilada momentos antes

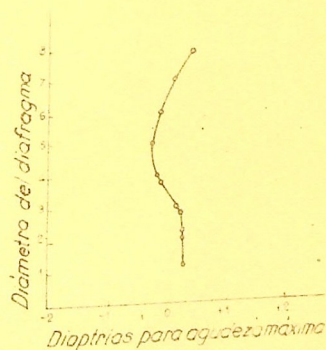
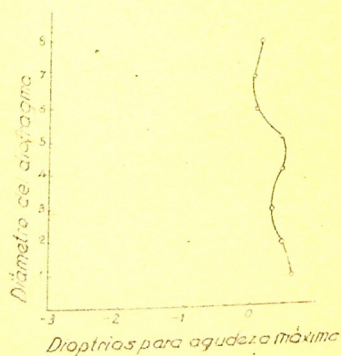


Fig. 29.

jos de Ames y Proctor, el plano de proyección se desplaza hacia la izquierda hasta diámetros de unos 2 mm. (aberración subcorregida), retrocediendo a medida que entran en juego zonas exteriores que tienden a la sobrecorrección, y a partir del diafragma de 3,8 apr., los valores son sensiblemente constantes, debido a que aquellos son mayores que el tamaño que la pupila tiene para la iluminación del test de 20 lux.

En los ojos atropinizados se obtienen resultados algo diferentes. Para uno de los observadores el plano de proyección avanza ligeramente en dos escalones a las veinticuatro horas de atropinizado, siendo este avance de un sólo escalón y con ligero retroceso para la máxima apertura para el otro.

En conjunto el desplazamiento máximo del plano de proyección no alcanza a $1/2$ dioptría, confirmándose la primera observación.

Las medidas anteriores, hechas, no dan cuenta exacta de lo que sucedería en la visión crepuscular estando el ojo en las mismas condiciones, aunque se debe esperar que con el ojo atropinizado y utilizando el diafanómetro no se presente el fenómeno de la miopía nocturna. En efecto así es. Tres observadores realizan medidas con el ojo normal repitiéndolas 24 horas después de haberles instilado atropina. Las medidas experimentales dadas a continuación nos permitieron obtener las curvas de la figura 30 en las que

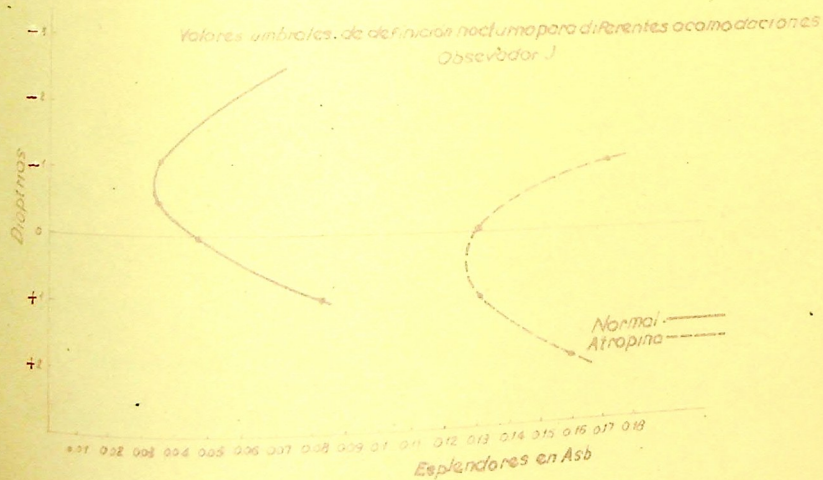
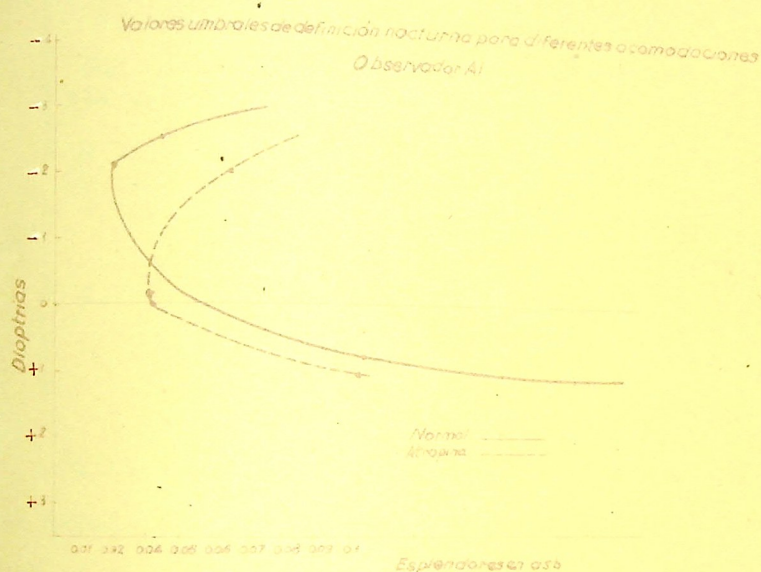
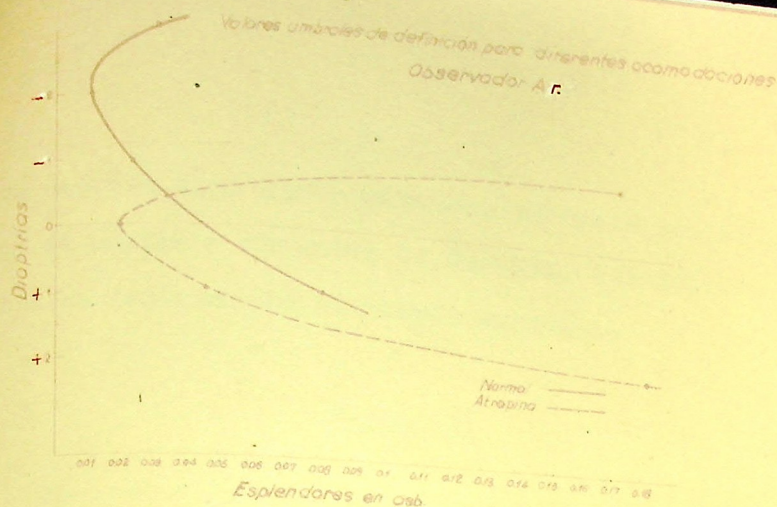


Fig 30

se vé que con ojos atropinizados, es decir con la pupila dilatada al máximo y carentes de facultad acomodativa, no se presenta el fenómeno de la miopía nocturna.

TABLA III

Observador J.			Observador Al.			Observador Ar.		
Diop.	Esplendor en asb.		Diop.	Esplendor con asb.		Diop.	Esplendor con asb.	
	Con atrop.	Sin atrop.		Con atrop.	Sin atrop.		Con atrop.	Sin atrop.
+2	0,151					+2	0,181	
+1	0,132	0,083	+1	0,103	0,146	+1	0,047	0,082
0	0,130	0,046	0	0,041	0,055	0	0,021	0,047
-0,5		0,026						
-1	0,169	0,035	-1	0,044	0,025	-0,75	0,091	
-2		0,058	-2	0,064	0,019	-1	0,179	0,024
			-2,5		0,044	-2		0,012
						-3		0,032

Estos resultados nos hicieron presumir que siendo anormal el estado del ojo sometido a la acción de los midriáticos, pudiera ocurrir que las consecuencias que sacásemos de este estado anormal no fuesen lícitas para el ojo funcionando libremente.

Nos interesaban, pues, ojos sin facultad acomodativa o con ésta muy restringida, pero que hubieran perdido dicha facultad de un modo normal. La solución fué fácil, pues los presbites están en estas circunstancias.

Escogimos tres: el primero tenía todavía 4 dioptrías de facultad acomodativa, y su "punctum remotum" se encontraba

en el infinito; el segundo conservaba 2 dioptrías con su remoto también en el infinito, y el tercero tan sólo conservaba 1/2 dioptría, teniendo su remoto a una distancia $s = +1,7$ m., es decir, detrás de la cabeza.

Realizadas las medidas con el diafanómetro y con la técnica descrita los resultados van reproducidos en las curvas de la figura 31 con arreglo a los valores siguientes:

TABLA IV

Observador He.		Observador Ae.		Observador Le.	
Diop.	Esplendor en asb.	Diop.	Esplendor asb.	Diop.	Esplendor en asb.
+1,4	0,086	-0,7	0,076	-0,7	0,076
+0,7	0,058	-1,4	0,030	-1,3	0,064
0	0,031	-2,6	0,024	-2,1	0,050
-0,7	0,065	-3,2	0,066	-2,7	0,050
		-3,6	0,106	-3,3	0,153

De su examen se deduce que en los dos observadores Ae y Le, que pueden acomodar 2 o más dioptrías, se presenta el fenómeno de la miopía nocturna, mientras que en el tercero, He, su pequeña facultad acomodativa la emplea para trasladar el "remotum" al infinito y el resto para mejorar su visión nocturna.

Vemos, pues, que con ojos sin facultad acomodativa natural o artificial, no se presenta mas que parcialmente el fenómeno de la miopía nocturna, mientras que si la facultad acomodativa subsiste, el fenómeno se presenta siempre y en una

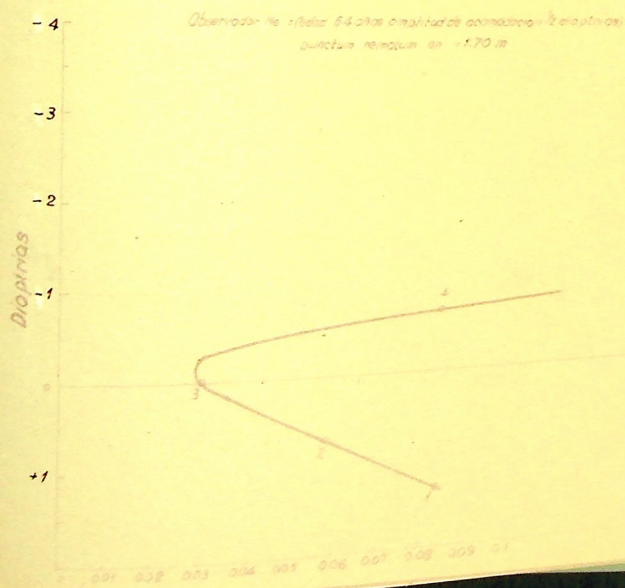
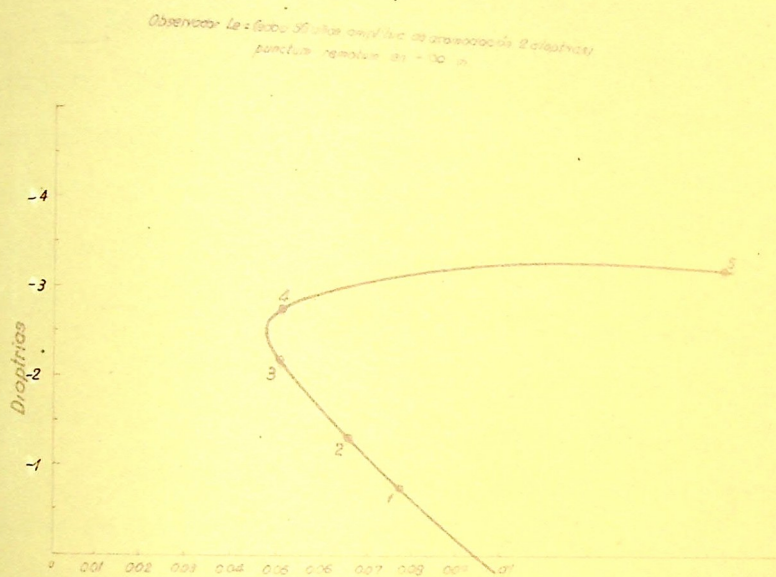
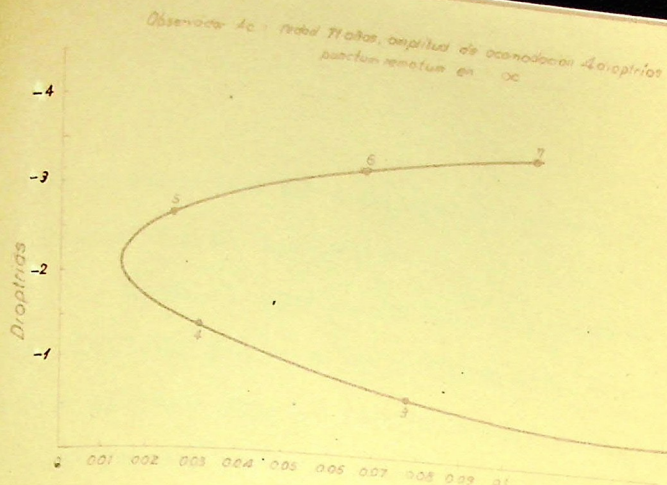


Fig. 31

cuantía aproximada de 2 dioptrías sobre el estado normal del ojo, acomodado al infinito.

Como el ojo tiene una aberración cromática considerable, faltaba por ver su influencia. Para ello se repitieron las medidas con el diafanómetro pero poniendo filtros coloreados lo mas próximo posible a la pupila de salida del anteojo de observación. Utilizamos para ello los filtros L_I, L_{II}, L_{III} de la casa Zeiss cuya absorción espectral está dada en la figura 32. Realizadas las medidas se obtuvieron las curvas representadas en las figuras 33, 34 y 35, haciendo, como en todas las observaciones dadas en ésta memoria, diez medidas en cada posición del ocular del anteojo. De la lectura de los valores obtenidos dados a continuación se vé que el desplazamiento del máximo corresponde en números redondos a $+1,0$ dioptrías para el rojo y $-1,0$ para el azul.

Esta serie de medidas experimentales confirman el fenómeno de la miopía nocturna ya que la aberración cromática que pudiera interpretarse como cause de ella, sólo altera la acomodación en $\pm 1,0$ dioptrías, permaneciendo el caracter miópico del ojo para bajas luminosidades.

TABLA V

Observador n° 2

Dioptrias

Esplendor en asb.

	L _{II}	L _I	L _{III}	Sin filtro
0	0,021	0,392	0	
-1	0,016	0,220	0,850	0,055
-2	0,017	0,046	0,740	0,024
-3	0,026	0,203	0,738	0,014
-4	0,035	0,325	0,863	0,024
-5	0,045	0,501		0,049
				0,099

Observador n° 3

Dioptrias

Esplendor en asb.

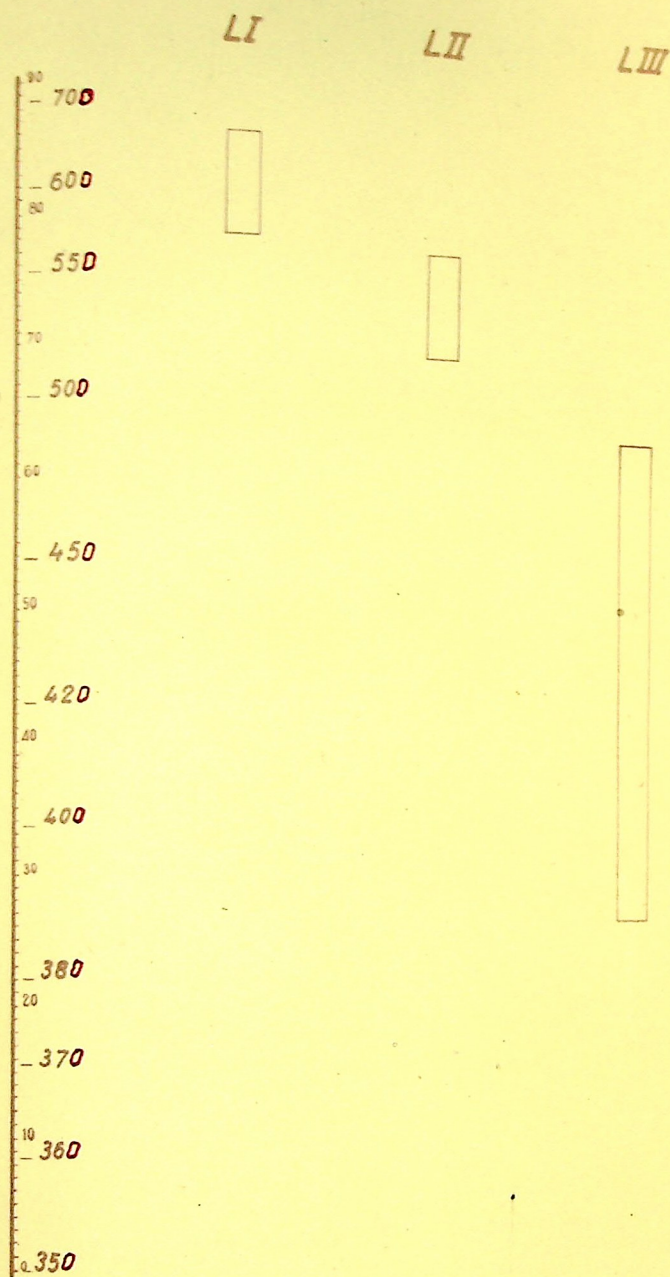
	L _{II}	L _I	L _{III}	Sin filtro
0	0,026	0,407		0,062
-1	0,018	0,225	0,901	0,024
-2	0,018	0,042	0,730	0,018
-3	0,031	0,243	0,742	0,025
-4	0,046	0,395	0,985	0,053
-5	0,057	0,624		0,101

Observador n° 7

Dioptrias

Esplendor en asb.

	L _{II}	L _I	L _{III}	Sin filtro
0	0,042			0,078
-1	0,037	0,243	0,760	0,045
-2	0,038	0,062	0,702	0,033
-3	0,046	0,123	0,695	0,046
-4	0,057	0,243	0,760	0,072
-5	0,068	0,438		0,136



Longitud de onda en μ .

Fig 32

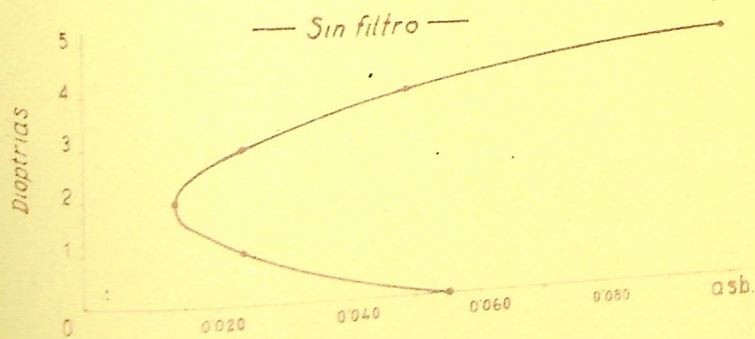
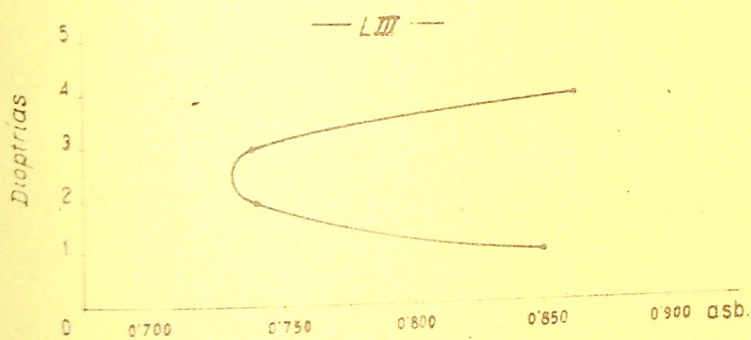
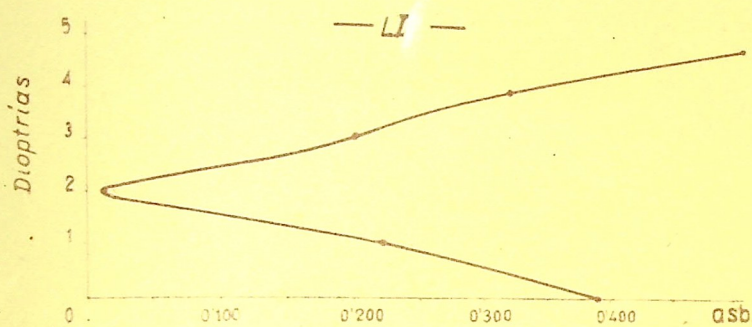
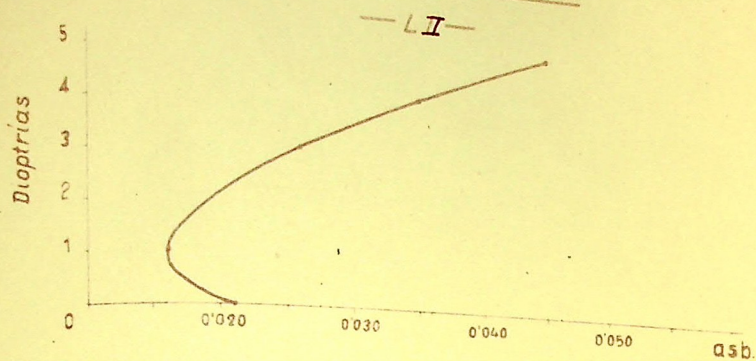
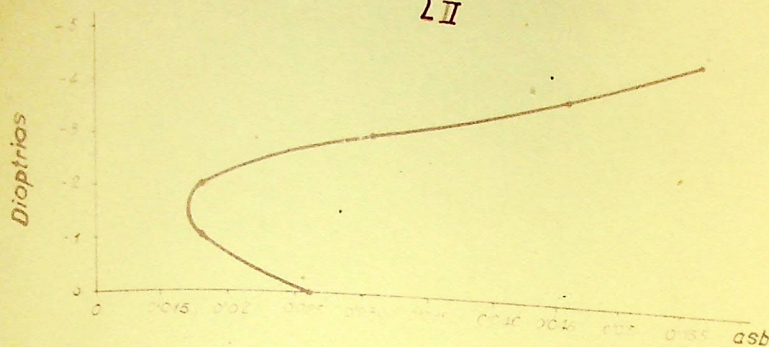
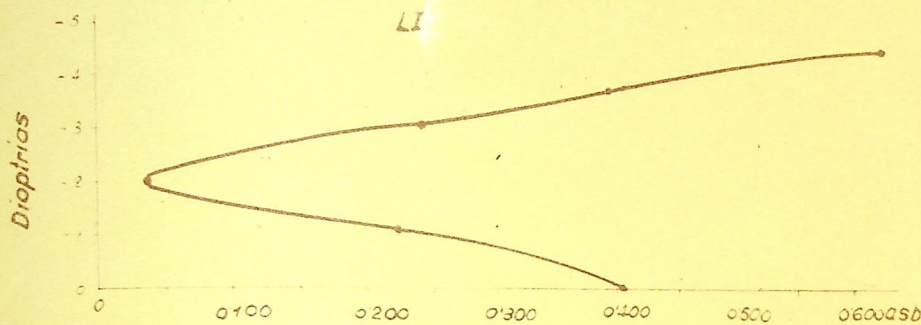


Fig.33

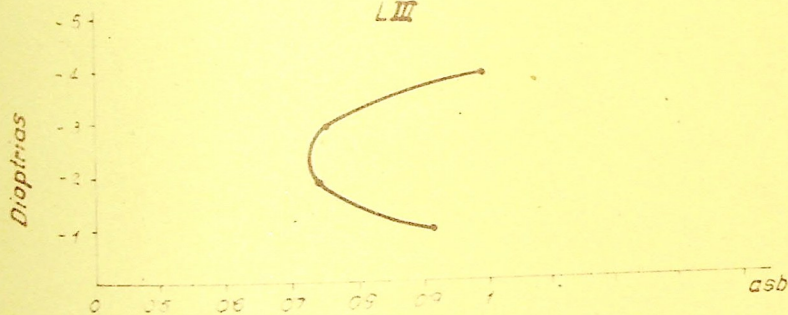
LII



LI



LIII



Sin filtro

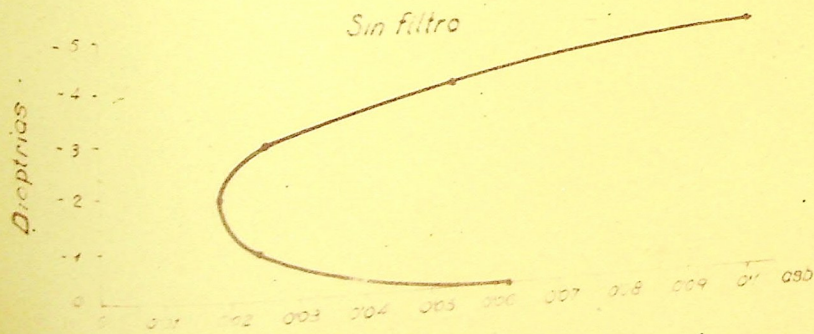


Fig. 34

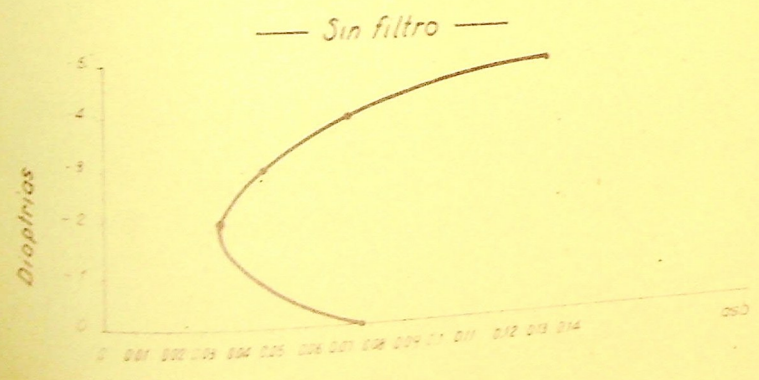
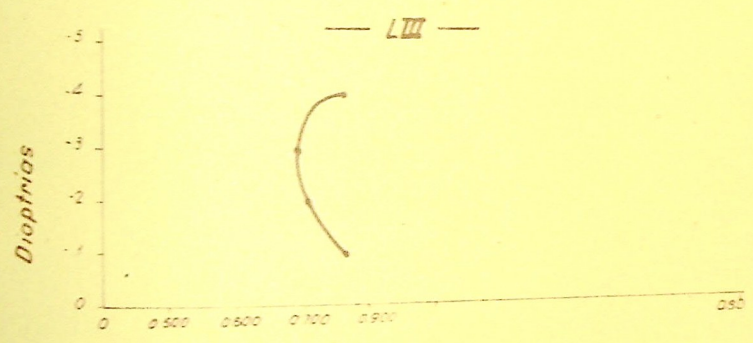
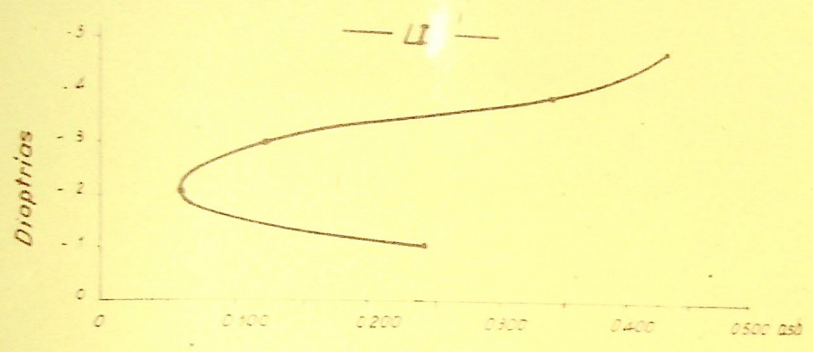
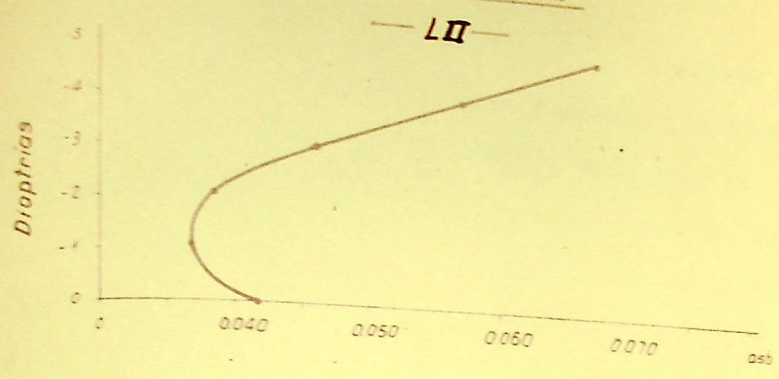


Fig. 35

El profesor Vasco Ronchi (85), director del Regio Istituto Nazionale di Ottica de Florencia, estudia las causas de la miopía nocturna, movido a ello por la lectura de las notas previas (86), (87), que por razón de prioridad hubimos de publicar. Después de reconocer nuestra primacía y de resumir nuestros trabajos para dar a conocer el fenómeno en Italia, lo comprueba plenamente calificándolo elogiosamente y señalando su importancia. Unas medidas experimentales con optotipos le dan pie para postular que la acción conjunta del efecto Purkinje y de la aberración cromática del ojo es la causa de la miopía nocturna. Con anterioridad al trabajo de Ronchi habíamos eliminado ya la aberración cromática del ojo como causa del fenómeno y aunque por comparaciones con otras medidas sospechábamos que con ojos atropinizados se iba a encontrar en cada una de las zonas del espectro un desplazamiento del máximo en una cuantía aproximada de 2 dioptrías, faltaba la comprobación experimental que nos parece decisiva para dilucidar la causa.

Como los filtros que empleamos, que son los "S" de la casa Zeiss, absorben bastante luz, no teníamos esplendor suficiente en el test utilizándolo el diafanómetro tal como lo habíamos hecho en medidas anteriores según está descrito en la figura 22, puesto que los espejos negros rebajan de tal modo el grado de transmisión que aun poniendo un foco luminoso muy potente no se podían percibir detalles utilizando los filtros. Transformamos el diafanómetro colocando el colimador

y el anteojo de observación de modo que sus ejes ópticos fuesen coincidentes. En la figura 36 damos dos fotografías que dan perfecta cuenta de la transformación hecha no teniendo que dar así su esquema, ya que con las figuras 22 y 23 queda suficientemente aclarado el montaje experimental.

Como sospechábamos el fenómeno se presentó con arreglo a nuestras hipótesis, es decir, las curvas con atropina y sin atropina presentan para cada uno de los filtros un desplazamiento del orden de 2 dioptrías.

Este experimento nos permite desechar la idea de que la acción conjunta del efecto Purkinje y la aberración cromática del ojo sea la causa de la miopía nocturna, afirmándonos por lo tanto en suponer que el estado de acomodación del ojo a -2 dioptrías es el que provoca el fenómeno.

La experimentación anterior nos da los valores contenidos en la tabla VI con los cuales se han construido las curvas de las figuras 37 y 38 en las que se vé claramente todo lo anteriormente dicho.

TABLA VI
Observador número 11

Dioptrías

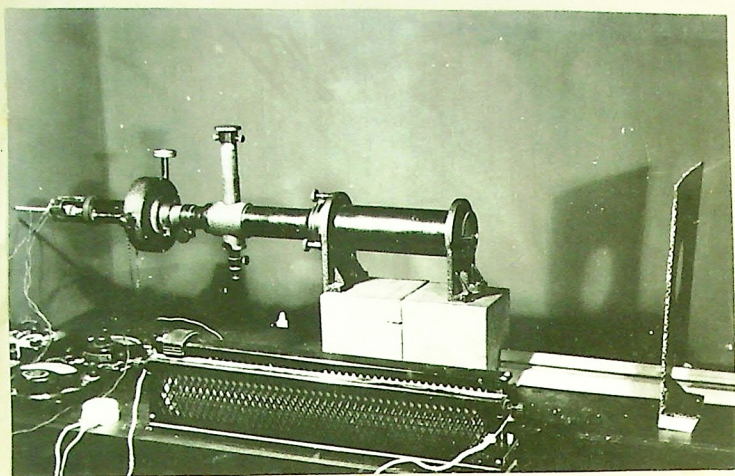
Esplendor en asb.

	Sin filtros		Filtro S 47		Filtro S 50	
	Con	Sin	Con	Sin	Con	Sin
	atropina	atropina	atropina	atropina	atropina	atropina
+2	----	----	----	----	----	----
+1,5	0,149	----	----	----	----	----
+1,0	0,027	----	----	----	----	----
+0,5	0,012	----	----	----	1,354	----
0	0,012	----	5,117	----	0,632	----
-0,5	0,013	0,109	2,099	----	0,254	----
-1,0	0,045	0,048	1,013	17,072	0,530	2,967
-1,5	0,027	0,016	2,099		1,119	
-2,0	----	0,015	5,382	4,469	----	0,283
-2,5	----	0,015	----	1,812	----	0,314
-3,0	----	0,027	----	1,753	----	0,364
-3,5	----	0,037	----	1,515	----	0,398
-4,0	----	----	----	1,772	----	----
-4,5	----	----	----	2,941	----	----

Dioptrias

Esplendor en asb.

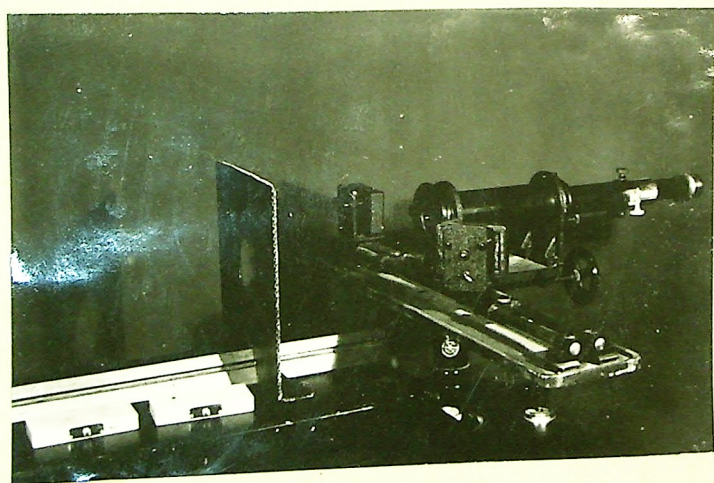
	Filtro S 57		Filtro S 72		Filtro S 75	
	Con	Sin	Con	Sin	Con	Sin
	atropina	atropina	atropina	atropina	atropina	atropina
+2,0	----	----	3,909	----	----	----
+1,5	0,833	----	1,523	----	----	----
+1,0	0,372	----	1,177	----	6,289	----
+0,5	0,145	----	1,731	----	5,174	----
0	0,078	----	3,195	2,835	4,284	6,891
-0,5	0,150	----	----	1,000	7,890	6,310
-1,0	0,285	0,2842	----	1,152	----	3,708
-1,5	----	0,1615	----	1,241	----	3,558
-2,0	----	0,1149	----	1,475	----	3,780
-2,5	----	0,1222	----	1,557	----	4,144
-3,0	----	0,1532	----	2,036	----	----
-3,5	----	0,2400	----	----	----	----
-4,0	----	----	----	----	----	----
-4,5	----	----	----	----	----	----



Manantial luminoso,
test y colimador.

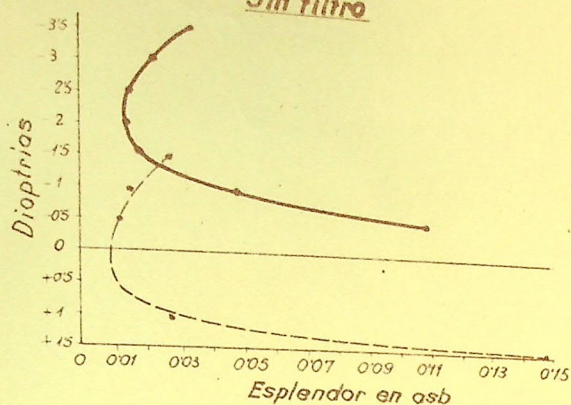
Fig. 36

Anteojo de
observación



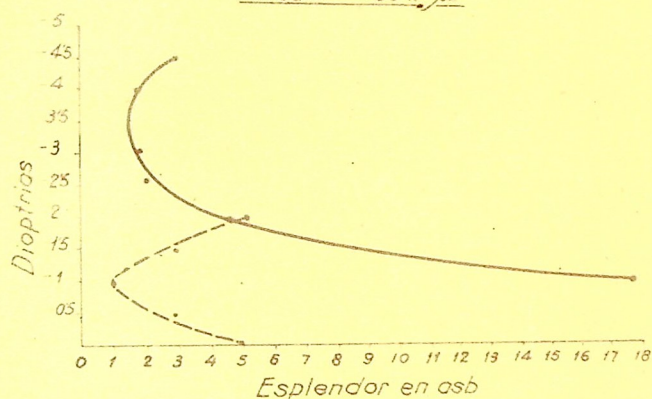
Observador II Sin filtro

28



Filtro S-47

$\lambda_{media} = 463 m\mu$



Filtro S-50

$\lambda_{media} = 494 m\mu$

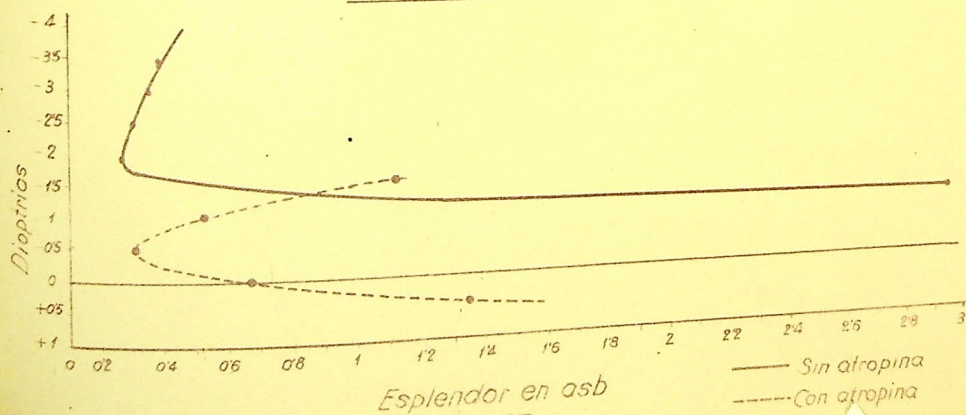


Fig. 37

Observador II

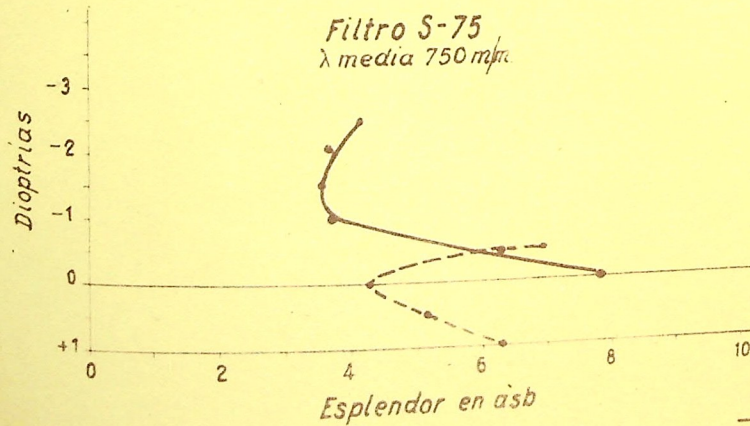
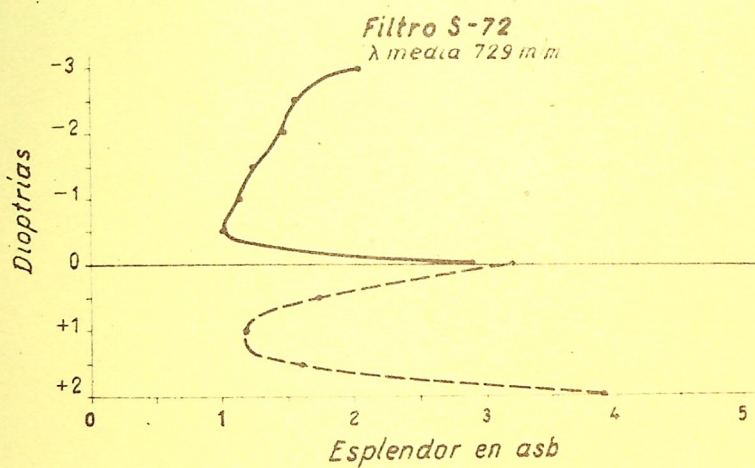
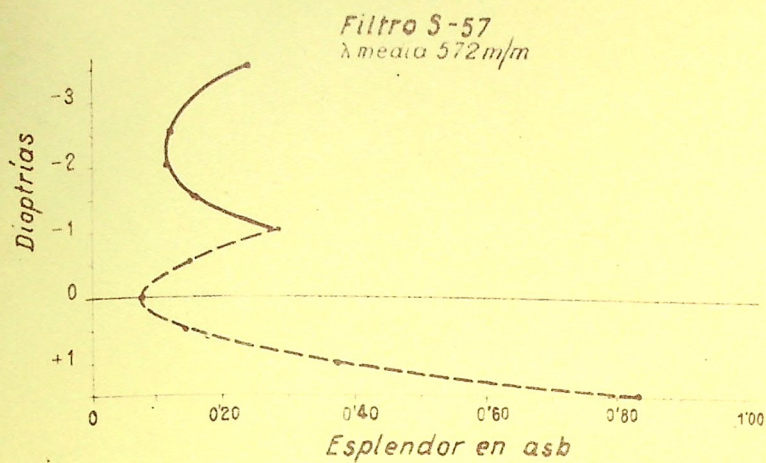


Fig. 38

— Sin atropina
--- Con atropina

20

B.) INTERPRETACION DE RESULTADOS.

La primera explicación del fenómeno fué achacarlo a la aberración esférica del sistema ocular a lo que nos animaba la variación tan grande de las razones de apertura existentes en el ojo adaptado a la luz y en el adaptado a la oscuridad. Pero la repetición de las medidas con ojos atropinizados y présbitas nos hizo desecher la idea, ya que al no presentarse la miopía sino tan solo un pequeño desplazamiento del plano de proyección inferior a $1/2$ dioptría, no podía la aberración esférica explicar por sí sola el fenómeno. En cambio sí quedaba demostrada la intervención de la acomodación puesto que con ojos sin facultad acomodativa, natural o artificialmente, no se presenta la miopía. La aberración cromática tampoco lo explica y por eso queda la acomodación como causa fundamental a la que hay que atribuir el fenómeno.

Entre las dos teorías mas importantes sobre la acomodación, las de Helmholtz, Gullstrand y Tscherning, ya descritas, parece mas viable la última para poder explicar el comportamiento del ojo ya que supone que al acomodar, la distancia frontal paraxial disminuye con mas rapidez que la marginal, tendiendo por tanto a formarse la imagen en la retina, compensándose así las aberraciones. De todas formas no parece que el fenómeno sea capaz de decidir francamente entre las dos últimas, si bien descarta la primera, ya que el mecanismo intracapsular de la teoría de Gullstrand hace los mismos efectos que la diferencia de radios en la de Tscherning.

mientras que en la teoría de Helmholtz no existe razón alguna para explicar el movimiento de la curva de aberración esférica necesario para interpretar con ello la miopía nocturna.

Realizadas estas medidas se publicó el trabajo del Prof. V. Ronchi, ya mencionado, que no modifica nuestras conclusiones. En efecto, hemos visto que en el ojo normal se presentaba el fenómeno de la miopía nocturna cuando se utilizaban filtros espectrales colocados lo mas próximo posible a la pupila de salida del instrumento de observación; aun cuando las zonas del espectro variasen se mantenía el carácter del fenómeno sin mas que una variación en el máximo del orden de 1,0 dioptrías, resultado esperado por ser este valor el que presenta la aberración cromática del ojo. El efecto de Purkinje desplaza como sabemos la sensibilidad cromática del ojo de 550 m μ . a 520 m μ . lo que ocasionaría un desplazamiento de la agudeza visual máxima nocturna a lo mas de 0,10 dioptrías, cantidad sin importancia si la comparamos con las dos dioptrías halladas para la miopía nocturna.

Operando en idénticas condiciones con ojos atropinizados vemos que no se presente el fenómeno en ninguna zona cromática, lo que confirme nuestra hipótesis y no justifica la de Ronchi que hace la miopía nocturna independiente de la acomodación. Queda ésta pues como la única causa capaz de explicar el fenómeno ya que con ella presenta el ojo un mínimo de la aberración esférica cuando pasa por la acomodación correspondiente a -2 dioptrías.

Es curioso el hecho que hace notar Ronchi de que este fenómeno haya pasado desapercibido a los numerosos autores que sobre temas análogos han realizado investigaciones, no encontrándose en la copiosa literatura revisada alusión alguna. En cambio los efectos causados y pruebas indirectas de la existencia del fenómeno son relativamente frecuentes y así vemos que Freeman estudia la agudeza visual en función de la distancia llegando a conclusiones totalmente falsas y Kñal encuentra la necesidad de introducir el nuevo factor que utilice el poder resolutivo y el reconocimiento de formas (*minimum cognoscibile*) para llenar una serie de lagunas que se presentan en el estudio del rendimiento visual de sistemas ópticos.

Piéron relata el hecho observado durante la guerra de 1914- 1918, cuando el sabio francés prestaba sus servicios como médico militar, en el frente belga. Al tratar de seleccionar soldados para las patrullas de descubierta nocturna, comprobó que los mas aptos eran los hipermetropes de 1 a 2 dioptrías, sin que sobre este hecho que cita en el "Traité d'Ophtalmologie" haya llegado a conclusión alguna. El hecho observado es natural ya que los hipermetropes de 1 a 2 dioptrías son emetropes en la visión crepuscular de acuerdo con el nuevo fenómeno de la miopía nocturna,

V. CONCLUSIONES:

Con lo anteriormente expuesto formulamos las siguientes conclusiones:

- 1^a. Existe un fenómeno que llamamos miopía nocturna que da lugar a una agudeza visual máxima nocturna cuando el ojo está solicitado natural o artificialmente por estímulos situados a 500 mm. de distancia. (cifra media).
- 2^a. La importancia de este fenómeno es extraordinaria ya que el rendimiento fotométrico del ojo medido como agudeza visual nocturna llega a aumentar en un 350 %, siendo así que todos los procedimientos geométricos y físicos para aumentarlo no llegan al 80 %.
- 3^a. La causa de este fenómeno no puede ser debida a la aberración esférica del ojo, como se ha demostrado experimentalmente.
- 4^a. El desplazamiento del punto remoto desde el infinito hasta la distancia de 500 mm. debido al corrimiento relativo del plano de proyección a causa de la aberración esférica, tampoco puede explicar el fenómeno ya que, como demostramos experimentalmente, la curva de la aberración esférica para grandes aperturas de la pupila vuelve su rama superior en el sentido de la sobrecorrección.

- 5^a. La causa de este fenómeno no puede ser la aberración cromática del ojo combinada con el efecto Purkinje, (Teoría de Ronchi), ya que experimentalmente se ha demostrado que aunque el desplazamiento de los valores óptimos oscilan entre -1 y -3 dioptrías al variar λ de 740 a 450 m μ existe un desplazamiento de -2 dioptrías aproximadamente para cada color que cesa al no existir acomodación.
- 6^a. No puede atribuirse la causa de este fenómeno a la visión de bastones o periférica ya que no se presenta cuando existe acomodación.
- 7^a. La única causa posible y mas probable del fenómeno es la existencia de una acomodación para la cual el sistema óptico del ojo tiene un mínimo de aberración esférica, estando este hecho comprobado experimentalmente por nosotros y de acuerdo con las medidas de distorsión hechas con el aberroscopio.
- Como consecuencias secundarias se han podido comprobar en el curso de los trabajos,
- 1^a. Que de acuerdo con las medidas de Nagel y Klughardt el tamaño de la pupila es de 3,05 mm. habiéndose medido su diámetro por medio de fotografía infrarroja.
- 2^a. El efecto Stiles-Crawford explica el por qué los rendimientos fotométricos no crecen con las áreas de las pupilas de salida, sino mas lentamente, como hubiera sido de esperar desde un punto de vista estrictamente geométrico.

VI. IMPORTANCIA DE LA MIOPIA NOCTURNA

La observación nocturna de importancia decisiva muchas veces en el transcurso de los combates, las medidas fotométricas con luminosidades bajas, problemas de astronomía y de meteorología, justifican el conseguir el mayor rendimiento luminoso posible en los instrumentos ópticos utilizados. Todos los ensayos realizados hasta ahora han tendido a modificar los factores geométricos y los físicos, como la razón de apertura, la elección de vidrios, el aumento del diámetro de los diafragmas entre los prismas y la disminución de las pérdidas por reflexión y por absorción entre los segundos. Con la modificación de dichos factores no ha conseguido la técnica actual una mejora superior al 80 % en el rendimiento luminoso de los sistemas. Lo que no se ha tenido en cuenta es la variación que los factores fisiológicos introducen en el rendimiento fotométrico de los instrumentos. Este problema es el que entra en vías de solución gracias al nuevo fenómeno de la miopía nocturna. Con él existe un mejoramiento en el rendimiento que llega a alcanzar un 350 %, es decir que en sistemas cuyo proyecto y cálculo se tiene previsto para una posición telescópica y para la correspondiente a -2 dioptrías puede permitir que se utilice en condiciones óptimas en cualquier clase de visión.

Desde el punto de vista de la fisiología de la visión, problema del que hoy en día no se ha dicho todavía la

última palabra, tiene la miopía nocturna el interés que supone el encontrar un fenómeno en el que predomina el factor acomodación por encima de los otros.

A sentar estas afirmaciones, que pudieran parecer un tanto pretenciosas, nos anima el trabajo de Ronchi últimamente publicado y el interés que ha despertado en el Instituto de Optica de Berlin, cuyo director el Prof. Franz Weidert ha pedido los resultados del trabajo para publicarlos en el Zeitschrift für Instrumentenkunde.

VII. FINAL

No quisiera terminar la presente memoria sin agradecer cordialmente la ayuda, el consejo y las facilidades de todo género que para mí trabajo he recibido de D. José María Otero de Navascués, Jefe de la Sección de Optica del Instituto Alonso de Santa Cruz, quien con su apoyo y dirección ha hecho posible la realización del presente estudio, ni puedo tampoco silenciar, por compañerismo y afecto, la colaboración callada, constante y entusiasta de aquellos miembros de dicha sección que se han prestado a hacer las medidas largas y molestas que exige la experimentación necesaria para llevar a feliz término el trabajo. Finalmente, no puedo olvidarme de dar las gracias al Profesor D. Julio Palacios, que apadrina esta memoria, por la ayuda y el apoyo prestados a su anti-

guo discípulo.

Al presentar mi tesis doctoral en la Universidad que ahonda sus raíces en los viejos claustros complutenses, gravita sobre mi ánimo el peso de la gloria tradicional de los que supieron mantener un Imperio con la Cruz alzada. En línea con ellos afirmo el principio inmutable de que el Verbo es la luz verdadera que alumbra a todo hombre que viene a este mundo y acorde con ello quiero cerrar la presente memoria pidiendo al Señor que acepte mis obras para que Dios sea glorificado en todo.

L A U S D E O

Amel Qui

BIBLIOGRAFIA

- (1) NAGEL und KLUGHARDT "Zur Dämmerungsleistung von Fernrohren". Zs. f. Instkde. 56, 222. 1936
- (2) V. RONCHI "Il diafanometro". Pubblicazioni dell'I.N.D.O. II Serie, n° 34
- (3) NAGEL "Zur Frage des Pupilleneffekt". Zs. f. Instkde. 60, 280. 1940
- (4) LÖHLE "Vergrößerung im Nachtsicht". Zs. f. Phys. 48, 80. 1928
- (5) KÜHL "Visuelle Leistung von Fernrohren". Z. f. tech. Phys. 7, 636. 1926.
- (6) KÜHL "Pupilleneffekt, Zapfen- und Stäbchensehen". Centralztg. f. O.M. 50, 349. 1929.
- (7) STREHL "Pupilleneffekt". Centralztg. f. O.M. 50, 349, 1929.
- (8) K. KRÜGER, J. ZENNEK "Über das Dämmerungssehen mit Ferngläser". Ann. Phys. 73, 242. 1924. ^
- (9) LÖHLE "Über die Verbesserung des Nachtschens durch Ferngläser". 49, 595. 1929
- (10) A. KÜHL "Die visuelle Leistung von Fernrohren". Zs. f. Instke. 47, 75. 1927.
- (11) RICCO Ann. di Ottal. 6, 1877.
- (12) PIPER Zs. f. Psychol. 32, 98. 1904. Végasse Piéron C.R. Biol. 83, 753. 1920.
- (13) J. FLÜGGE "Zur Frage der Sehschärfeverbesserung durch Ferngläser". Zs. f. Instkde. 55, 367, 1935.
- (14) G. BOCHINO "Influenza della pupilla di entrata e di uscita sulle luminosità delle immagini del cannocchiali". Ottica II 39. 1937.

- (15) F. STABLE
"Über der Farbensaumfehler" Zs. f. Instkde. 61, 185. 1941
- (16) H. DENNIS, TAYLOR
"The adjustment and testing of telescope objectives". T. Cook. York. England 1896.
- (17) P. AMY
"Contribution à l'étude de la réflexion vitreuse". Rev. d'Opt. 6, 305. 1927
- (18) F. KOELLMORGEN
Trans. Soc. Ill. Eng II, 220. 1916
- (19) G. BAUER
"Zur Dickenbestimmung dünner durchsichtiger Kristallschichten". Ann. Phys. 8, 7. 1931.
- (20) A. F. TURNER
"Baush and Lomb Educational Board" Spring 1941. Baush and Lomb
- (21) J. STRONG
"On a method of decreasing the reflection from nonmetallic Substances" J.O.S.A. 26, 73, 1936
- (22) A. SMAKULA
"Über die Erhöhung der Lichtstärke optischer Geräte". Zs. f. Instkde. 60, 33. 1940
- (23) D.R.P. n° 685767
1^{re} nov. 1935 (Carl Zeiss)
- (24) K.B. BLODGETT, J. LANGMUIR
Phys. Rev. 51, 964. 1937
- (25) C.H. CASTWIGHT, A. F. TURNER
Bull. Amer. Phys. Soc. 13. Nr. 7, 10, 1938. 14 Nr. 11, 8, 1939.
- (26) P.C. SCHEIDNER
"Oculus, sive fundamentum opticum" Innsbruck 1619.
- (27) J. KEPLER
"Paralelipomena ad Vitellionem"
- (28) O. YOUNG
"Oeuvres ophtalmologiques". Traducción y anotación de Tschering. Copenhagen 1894.
- (29) A. GULLSTRAND
"Die optische Abbildung in heterogenen Medien und die Dioptrik der Kristalllinse des Menschen". Svenska Vetensk. 1908, pag 43, 1-58
- (30) J.B. LISTING
"Beiträge zur physiologischen Optik". Göttingen 1845

(31) A. GULLSTRAND

En H. von Helmholtz "Handbuch der physiologische Optik" Tomo I pag 335. 1909.

(32) M. NAGEL, A. KLUGHARDT

"Über Messungen der Dämmerungspupille des Auges mittels Ultrarotphotographie" Zs. f. Phys. 101, 372, 1936.

(33) A. BROCA

"Un pupillomètre" Rev. D'Opt. 3, 493 1924.

(34) F. MOSS

"A modified Broca Pupillometer" J. O.S.A. 22, 735. 1932.

(35) J.A.M. Von LIEMPT,
J.A. de VRIEN

"Pupillenmessungen bei monochromatischen Licht". Physica 7, 961. 1940

(36) M. LUCKIESH, F. MOSS

"Seeing in sodium-vapordlight" J.O.S.A. 24, 10, 1934.

(37) J. BLANCHARD

"The brightness sensibility of the retina" Phys. Rev. 11, 81, 1918

(38) G. ABELSDORF

"Die Änderungen der Pupillenbreite durch verschiedenfehlige Belichtung" Z.f. Phys. u. Phys. der Sin. 23, 81. 1900.

(39) P.G. NUTTING.

J.O.S.A. 4, 55. 1920

(40) P. REEVES

"The response of the average pupil to various intensities of light", J.O.S.A. 4, 35. 1920.

(41) R.C. HERMAN

"Note in the measurement of pupil-lens diameters". J.O.S.A. 30, 316 1940.

(42) TSCHERNING

"Optique physiologique" Carré et Naud. Paris 1898.

(43) R. DESCARTES

"Dioptrique" pag. 120 y sig. Edición de 1668. Th. Giraud. Paris.

(44) H. von HELMHOLTZ

"Handbuch der physiologische Optik". 3 tomos, 3ª edición. 1909 Leopold Voss.

(45) TSCHERNING

Ann. de la Policlinique de Paris déco 1893.

(46) "

Conges inter. d'Edimburg 1894

- (47) TSCHERNING
Ann. d'oc. 131, 169. 1904
- (48) "
"Hermann von Helmholtz et la
théorie de l'accommodation" Paris
O. Ovin. 1909.
- (49) V. STUDNITZ
"Physiologie des Sehens" Leipzig
1940. Akademische Verlagsgesell-
schaft.
- (50) A. MAGINOT
"Modification de la rétine sous l'
influence de la lumière" en el to-
mo II de la obra "Traité d'Ophtal-
mologie" publicado por la Société
Française d'Ophtalmologie. Masson
et Cie. Paris 1939
- (51) E.D. ADRIAN, R. MAT-
THEWS
"The action of light on the eye"
I Discharge of impulses in the op-
tic nerve and its relation to the
electric changes in the retina. J
Physiol. 63, 1927
- (52) R. GRANIT
"Die Elektrophysiologie der Netzhaut und des Sehnerven". Kopenha-
gen 1936.
- (53) CHARPENTIER
C.R. 92, 995, 1880
- (54) ASHER
Z.f Biol, 35, 394. 1897
- (55) LOESER
Arch. f. Opt. 60, 97. 1905
- (56) ABNEY
Proc. Roy. Soc. London 87, 147. 1922
- (57) KÜHL
"Theorie des Lichtsinns" 58, 481.
1938
- (58) B. SCHÖNWALD
"Das Ricó'sche Gesetz und die Seh-
schärfe". Das Licht 11, 15, 1941
- (59) GEHLMORE SCHERING
"Zs. f. Beleuchtungsmessen 25, 17.1919
- (60) KÜHL
Centr. Ztg. f. Optik u. Mech.
44, 121, 1925
- (61) KÜHL
"Die Sehschärfe des menschlichen Au-
ges mit und ohne Fernrohr Centr.
Ztg. f. Optik u. Mech. 50, 202 y
218. 1929
- (63) FREEMANN
"Anomalies of visual acuity in rela-
tion to stimulus-distance. J.O.S.A.
22, 285, 1932

- (64) M. LUCKIESH, F.K. MOSS "The dependency of visual acuity in relation to stimulus-distance". J.O.S.A. 23., 25. 1933.
- (65) W. ARNDT "Sieht man bei farbigem Licht besser?" Das Licht 4, 64. 1934.
- (66) C.G. KLEIN "Sieht man bei farbigem Licht besser?" Das Licht. 4, 81, 34
- (67) W. ARNDT, A. DRESLER "Über das Sehen bei Natriumdampf- und Glühlampenlicht". Das Licht 3, 213, 1933.
- (68) L. SCHNEIDER "Das Sehen bei farbigem Licht". Das Licht 4, 122. 1934.
- (69) M. LUCKIESH, F.K. MOSS "The effect on visual acuity of shortening the spectrum at the blue end" J.O.S.A. 10, 275. 1925.
- (70) " " "Visual acuity under the mercury arc and tungsten filament lamp". Journ. Franklin. Inst. 205, 565. 1928
- (71) " " "Visual acuity and sodium vapor light" Journ. Franklin. Inst. 215, 405. 1933
- (72) H. SCHÖBER, H. JUNG "Die Ursachen der verschiedenen Sehschärfe des menschliche Auges bei weissen und farbigem Licht". Zeits. f. tech. Phys. 17, 84. 1936.
- (73) H. SCHÖBER, K. WITTMANN "Untersuchungen über die Sehschärfe bei verschieden farbigen Licht". Das Licht 8, 199, 1938
- (74) J. PLOCH "Optische Abbildung. Einführung in die Wellen- und Beugungstheorie optischer Systeme". Brennschweig 1931. Friedrich Vieweg.
- (75) A. KÜHL "Zur Erklärung der Änderung der Sehschärfe mit der Beleuchtung und des absoluten Sehschärfemaximums". Zts. f. opt. Optik 28, 33 1940.
- (76) J. E. PURKINJE "Beobachtung und Versuche zur Physiologie der Sinne. II Neue Beiträge zur Kenntniss des Sehens in

- subjetiven Hin. icht. Berlin 1825
pag. 109-110
- (77) AUBERT H. (u. FÖRSTER) Graefes Arch. 3 (2), 9 (1857) -
Molenschotta unters. z. Naturleh-
re. 4, 17. 1858.
- (78) EINO KAILA "Eine neue Theorie des Aubert-
Försterschen Phänomens". Z. Psy-
col. 86, 193. 1921.
- (79) STILES W.S., CRAWFORD "The luminous efficiency of rays
B.H. entering the eye pupil at different
points". Proc. Roy. Soc. London.
Ser. B 112, 428, 1923.
- (80) STILES W.S. "The luminous efficiency of mono-
chromatic entering the eye pupil at
different points and a new colour
effect". Proc. Roy. Soc. London Ser.
B, 123, 90. 1927.
- (81) STILES W.S. "The directional sensitivity of the
retina and the spectral sensitivi-
ties of the rods and cones". Proc.
Roy. Soc. London. Ser B 127, 64,
1929
- (82) HERRING E. "Wiss. Abhandlungen Hrsg. v. d.
Sächs. Akad. d. wiss. (Leipzig 1931)
2. tomos.
- (83) TRENDLENBURG W. "Gesichtssinn" In Lehrbuch der Phy-
siol. d. Menschen 2. Aufl. Leipzig
1924.
- (84) RICHTER M. "Grundriss der Farbenlehre der Ge-
genwart". Dresden und Leipzig. 1940
Theodor Steinkopff
- (85) V. RONCHI "La cause della "miopia notturna"
Ottica. Febrero 1943
- (86) J.M. OTERO, A. DURAN "Rendimiento fotométrico de siste-
mas ópticos a bajas luminosidades"
An. de Fis. y Quim. Tomo XXXVII p.
459. 1941
- (87) J.M. OTERO, A. DURAN "Continuación del estudio de la
miopía nocturna" Notas II y III
An. de Fis. y Quim. Tomo XXXVIII
p. 236. 1942

Amel One

Reunidos los abogados firmantes que constituyen el tribunal
calificador de la presente tesis doctoral han acordado tras
las oportunas deliberaciones concederle por unanimi-
dad la calificación de sobresaliente.

Madrid 18 de junio de 1943

Julio Palau
J. Baltá

E. Terradas
Mañanah
Francisco Morán