

INVESTIGACION DE LA VISION ESTEREOSCOPICA

H. C. RAASVELDT,
Sección de Fotogeología, Instituto Geológico Nacional,
Ministerio de Minas y Petróleos.

TRADUCIDO AL ESPAÑOL POR EL DOCTOR JAIME TORRES (1)

RESUMEN

Se hace un análisis de los fenómenos relacionados con la visión estereoscópica que lleva a la conclusión de que el estereoscopismo está basado en procesos fisiológicos. Una clara distinción debe ser hecha entre la visión estereoscópica natural de la vida diaria y las condiciones artificiales de observación, como por ejemplo, bajo un estereoscopio. En el primer caso, ciertos factores fisiológicos están en completa armonía, mientras que en los casos de visión no natural aparecen tendencias en pugna. Las fuerzas relativas de varios factores desarmónicos determinan el sitio del estereomodelo observado. La visión estereoscópica con ejes visuales paralelos o divergentes puede en esta forma ser explicada sobre una base fisiológica. Una simple suposición nos capacita para extender la teoría de proyección para esos casos y para reconstruir geométricamente el estereomodelo observado. Todas las propiedades de este estereomodelo tales como escala horizontal, escala vertical y exageración vertical pueden entonces ser determinadas para todos los casos de la visión estereoscópica con o sin lentes que el foto-intérprete encuentra en circunstancias normales.

I—INTRODUCCION

Para varios grupos de foto-intérpretes quienes corrientemente usan fotografías estereoscópicas, adquiere cada día una mayor importancia conocer la relación geométrica entre el original fotografiado y el modelo observado por medio de estas copias, ya sea con el estereoscopio o con los ojos simplemente.

El problema puede ser estudiado, con éxito, solamente con una comprensión básica de la visión estereoscópica. Un análisis de algunos de los fenómenos envueltos en la visión binocular fue intentado por von Frijtag Drabbe. Infortunadamente los conceptos expuestos en su estudio son muy confusos.

Von F. Drabbe se enmarañó en varios de estos fenómenos, especialmente en aquellos que lo indujeron a introducir la idea de la "*imagen transmitida*". Su estudio, caracterizado por una gran imaginación inventiva, fue así desafortunadamente conducido a un punto muerto sin conclusiones.

(1) El original inglés de este artículo fue presentado para la publicación en el exterior. En la edición castellana el autor ha introducido algunas adiciones.

Aun cuando su teoría sobre visión estereoscópica se impugna en este artículo, a von Frijtag Drabbe le debemos quedar reconocidos por los dos detalles siguientes:

1) El fue el primero en advertir la inaplicabilidad de la tesis de *Wheatstone* bajo las condiciones de visión no natural. Esta tesis sostiene que la imagen estereoscópica es vista donde los ejes visuales se intersectan.

2) Introdujo cierta técnica para sacar conclusiones de experimentos simples que todo el mundo puede hacer.

Esta "técnica" ha sido seguida y desarrollada en este artículo (especialmente en la Sección III). Parece que todo lo que es esencial para el intérprete puede ser investigado por medios muy simples.

Muy probablemente von Frijtag Drabbe no hubiera llegado a las mismas conclusiones si él hubiera consultado los resultados de la óptica fisiológica. Pero es necesario hacerlo para llegar a una comprensión de la visión estereoscópica en general y particularmente es un requisito para el entendimiento de los fenómenos abarcados por von F. D. y tratados en este artículo. Para la conveniencia del lector los tópicos más importantes de la fisiología óptica son presentados en forma sinóptica en la Sección V, aun cuando debe estar preparado para encontrarlas mezcladas con opiniones personales del autor.

En la primera parte de este estudio se analizará la tesis de v. F. D.² y se demostrará su imposibilidad, para luego presentar la opinión nuestra.

El autor no pretende explicar todos los casos posibles de visión estereoscópica. Se dirige especialmente al intérprete que examina fotografías a vista simple o con ayuda de estereoscopios corrientes de lentes o de espejos. Solamente estos casos son tratados por completo.

Sin embargo, esto no significa que los principios establecidos adelante en este artículo sean aplicables solamente al campo de la foto-interpretación. Podemos también utilizarlos para cualquier situación de estereoscopismo, tales como las proyecciones en tres dimensiones ya sean fijas (diapositivos sin movimiento) o cinematográficas, estereo-microscopios, etc.

(2) Abreviamos así, o en forma similar, el nombre de von Frijtag Drabbe, Director del Servicio Topográfico del Gobierno de los Países Bajos.

Varios ejemplos expuestos en la Sección X, muestran cómo la teoría puede ser aplicada en casos específicos.

II—"LA IMAGEN TRANSMITIDA"

Von Frijtag Drabbe presenta sus ideas como deducciones de algunos experimentos simples y uno de los conceptos básicos desarrollados en esta forma es aquel de la *imagen transmitida*. Refirámonos a sus experimentos No. 3 y No. 4.

Experimento No. 3 y la teoría de von Frijtag Drabbe sobre la visión estereoscópica.

Es, en principio, como sigue: fije la vista en un objeto a una distancia aproximada de 4 m. y coloque un dedo a 10 cm. de la nariz. El dedo se verá doble. Si se cierra el ojo izquierdo, la imagen derecha del dedo desaparecerá o viceversa. En el primer caso, el dedo visto con el ojo izquierdo es "proyectado" mentalmente cerca del eje del ojo derecho y así el dedo visto con el ojo derecho es "proyectado" frente al ojo izquierdo.

Von Frijtag Drabbe tiene las siguientes concepciones sobre el fenómeno: el dedo visto con el ojo izquierdo es "*transmitido*" al ojo derecho. El sugiere que esta transmisión tiene lugar en el cruce de las fibras nerviosas en nuestra cabeza³, donde las impresiones nerviosas del ojo izquierdo, según él, son introducidas en los canales nerviosos del ojo derecho. Así, de acuerdo con su tesis, si cerramos el ojo izquierdo, la imagen no es recibida por este ojo y por ello nada puede ser transmitido al ojo derecho. Como consecuencia, la imagen opuesta al ojo derecho desaparecerá.

La visión estereoscópica sería obtenida por la combinación de la imagen directamente observada del ojo derecho y la imagen transmitida que él recibiría del ojo izquierdo. Lo que se ha dicho sobre el ojo izquierdo se aplica en forma inversa al ojo derecho, que a su vez, podría transmitir una imagen al ojo izquierdo. La razón por la cual no vemos dos imágenes estereoscópicas, es explicada por v. F. D. mediante la suposición de que tenemos un *ojo activo o preferencial* que efectúa la combinación de las imágenes observada y transmitida en una sola imagen estereoscópica, o tridimensional. El otro ojo funciona de manera *pasiva*, es decir, solamente tiene que suplir la imagen transmitida!

Esta es, en forma somera, la teoría de la visión estereoscópica propuesta por v. F. D.

Los fenómenos relacionados con este experimento son corriente y adecuadamente explicados por

(3) Muy probablemente v. F. D. se refiere al quiasma, vea Fig. 10. La anatomía de nuestro sentido óptico, descrita brevemente en la Sección V, parece oponerse a su tesis, porque en su "experimento No. 3" las imágenes retinales se proyectan en los hemisferios temporales, cuyos nervios ópticos no se cruzan en el quiasma. Vea también la nota acerca de los resultados de Zsily, en la misma Sección.

la tesis de los puntos retinales correspondientes, presentada en la Sección V. El experimento 3 es conectado directamente por von F. D. con su experimento 4, sin mucho fundamento como el lector lo notará más adelante en este artículo.

Experimento No. 4

(Véase la Fig. 1, una reproducción de la Fig. III de v. F. D.).

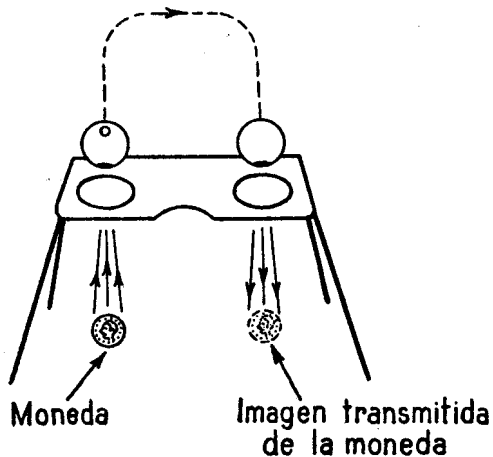


Fig. 1.—El "experimento No. 4" de von Frijtag Drabbe con una moneda y un estereoscopio de bolsillo.

En este experimento se pone una moneda bajo un estereoscopio de bolsillo, para ser vista por el ojo izquierdo. Todos los detalles de esta moneda pueden ser reproducidos con lápiz sobre un pedazo de papel puesto bajo el lente que corresponde al ojo derecho. Para explicar este fenómeno, sorprendente a primera vista, él supone nuevamente que la imagen observada por el ojo izquierdo, es transmitida al ojo derecho, y como queda presente en el ojo derecho no es difícil de explicar que los contornos y detalles de la moneda pueden ser dibujados con el lápiz, el cual es realmente observado por el ojo derecho, en una forma tal, sobre el papel que las imágenes transmitida (moneda) y observada (lápiz) coincidan.

De acuerdo con el autor, el fenómeno debe ser explicado en una forma completamente diferente, pero antes de que entremos en la discusión de esta cuestión, es necesario analizar la visión normal binocular.

Visión Normal Binocular

Observando un objeto atentamente en la vida diaria (por ejemplo una moneda, vea la Fig. 2a), supondremos por el momento que, básicamente, cuatro cosas van a suceder (1 convergencia, 2 acomodación, 3 transformación y 4 proyección):

1. *Convergencia*: Los ejes de los ojos son dirigidos o convergidos al objeto de nuestra atención formando cierto ángulo γ .

Actuando así, estamos seguros que la imagen de este objeto es formada en la región más sensitiva donde se encuentra la visión más aguda de toda la

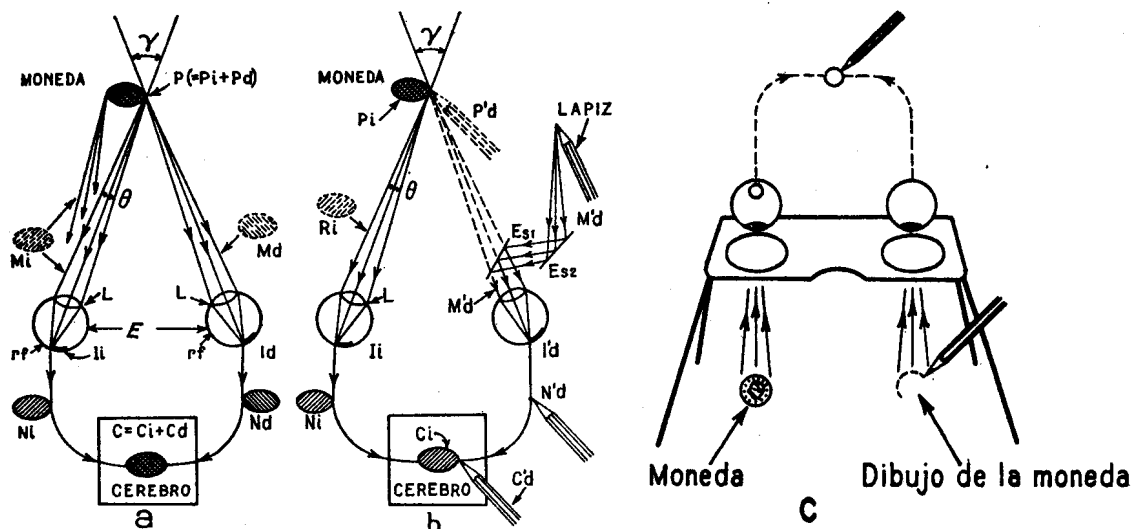


Fig. 2.—Análisis del experimento del estereoscopio y la moneda.

retina, es decir, en la “fóvea centralis”, una pequeña depresión de la mancha amarilla (mácula lútea).

Tiene un diámetro aproximado de 0.44 mm y cubre un ángulo de $2^{\circ} 10'$ a $2^{\circ} 25'$. La fóvea humana no tiene bastoncillos⁴ sino una gran profusión de delgados conos. Los conos alejados de la fóvea son más grandes pero menos numerosos. Los de la fóvea están conectados separadamente por fibras nerviosas individuales con el centro cerebral que corresponde a la visión, mientras afuera de la fóvea varios conos están unidos por un nervio común. Esto hace que la visión tenga un máximo de nitidez en el área de la fóvea y que la nitidez disminuya rápidamente en las áreas más alejadas de la mácula (vea la Fig. 3).

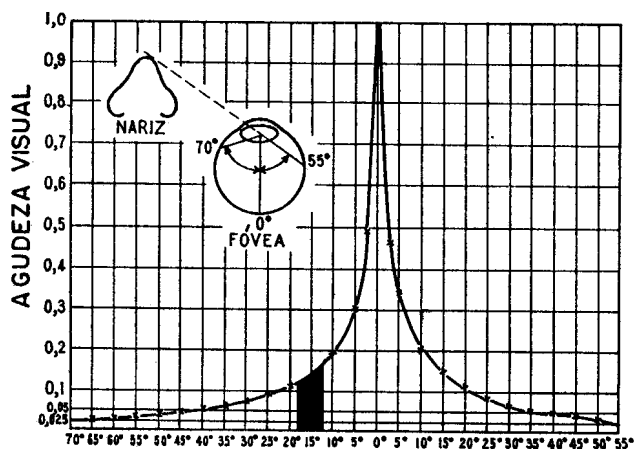


Fig. 3.—La agudeza visual que tiene un máximo muy acentuado disminuye rápidamente hacia los lados de la retina (70° y 55°). La columna negra en el gráfico representa el punto ciego del ojo. Según Landois-Rosemann.

2. *Acomodación*: Acomodamos los lentes de nuestros ojos a la distancia que nos separa del objeto.

De cada punto material del objeto (Fig. 2a) un haz de rayos luminosos divergentes, que forma un pequeño cono con un ángulo θ , es transformado por cada lente L del ojo en un haz de rayos que converge en la retina fotosensitiva rf. Todos los puntos materiales en conjunto emiten un mazo de haces de rayos luminosos (Mi para el ojo izquierdo, Md para el derecho) que representa la moneda en una forma

(4) De acuerdo con la “teoría de la duplicidad”, los bastoncillos solamente funcionan cuando hay poca luz y por consiguiente no es necesario tratar sobre ellos en este artículo. La visión en la obscuridad se realiza por medio de la parte retinal que rodea la fóvea.

más bien caótica. Estos agregados, al parecer caóticos, de rayos luminosos (Mi y Md) son ordenados por los lentes del ojo L de tal modo que el haz de rayos luminosos que viene de un punto reproduzca precisamente ese punto en la retina. De esta manera se forman las imágenes de la retina Ii e Id que son reproducciones punto por punto de la moneda.

3. *Transformación de la luz en impresiones nerviosas*: Las imágenes Ii e Id proyectadas en las retinas, subsecuentemente son convertidas en “impresiones nerviosas” (Ni, Nd) y conducidas al “centro cerebral de visión”. Aquí ambas imágenes son convertidas en algo fisiológico, que podríamos llamar para fácil referencia, la “imagen cerebral”⁵.

4. *Proyección mental*: A pesar de que la imagen cerebral (C) se forma en la parte posterior de la cabeza (cortex occipital), nuestra mente interpreta el último resultado como si las impresiones visuales vinieran de alguna parte frente a nosotros, o, en este caso particular, del sitio donde se encuentra la moneda. Es evidente que la impresión visual es proyectada hacia afuera por un proceso mental. Esta imagen mentalmente proyectada (P) incorrectamente la identificamos con el objeto real (moneda) y estamos tan acostumbrados a hacer esto que es difícil renunciar a esta identificación. Los experimentos con espejos, prismas, o cualquier medio que cause refracción (el agua con un palo medio sumergido), imágenes dobles, nos enseñan que en muchos casos el objeto no está donde parece. Estos hechos sólo pueden ser explicados satisfactoriamente por medio de la tesis de la imagen mentalmente proyectada, porque ¿cómo puede el objeto bajo todas apariencias estar allá donde no está localizado en realidad, excepto por un proceso de la mente que, engañada por trucos físicos, los coloca en un lugar falso? Aparentemente sólo controlamos los rayos luminosos desde el instante en que llegan a nuestros ojos, pero no tenemos medios directos de chequear lo que les sucede antes de alcanzar nuestros medios ópticos. Sobre esto nuestra mente puede

(5) El dibujo está simplificado a propósito. Vea más adelante la Fig. 10.

sólo en forma indirecta deducir la realidad por la experiencia o por la investigación. Después de alguna reflexión, será claro que esta imagen proyectada es tan real en las esferas psíquicas, como lo es una silla en nuestro mundo físico. Para expresar las cosas más claramente, podríamos inclusive declarar que, en cierto sentido, no “vemos” el mundo físico. Lo que realmente observamos es una proyección mental hacia afuera automáticamente provocada por los rayos luminosos que llegan a nuestros ojos.

El problema de la visión estereoscópica puede así ser resumido en la forma siguiente: Exceptuando casos especiales (espejos, palo en el agua) proyectamos mentalmente la imagen del objeto en el mismo sitio donde el objeto está verdaderamente presente, al menos si miramos en una forma natural. Ahora el problema es: dónde proyectamos la imagen bajo condiciones no naturales de visión binocular y cuáles son los principios que gobiernan esta proyección?

Es importante anotar que esta imagen mentalmente proyectada (P) es experimentada como una simple unidad que corresponde con el objeto observado. Como cada ojo observa el objeto desde una posición diferente ya que ellos están separados por cierta distancia E (base entre los ojos), dos imágenes diferentes (Ci y Cd), son *fundidas* (combinadas o sintetizadas) en el centro cerebral para la visión y ésta es la razón para que la imagen psíquicamente proyectada (P) tenga cualidades tridimensionales. Sin la fusión previa, dos imágenes diferentes, no estereoscópicas y solamente superpuestas (Pi y Pd), serían exteriorizadas por la proyección mental (Fig. 2b, lápiz y moneda planos).

Interposición de otra imagen en el curso de los rayos luminosos muestra que el experimento 4 puede ser explicado sin el concepto de la imagen transmitida.
(Vea Fig. 2b)

Interceptemos el mazo de rayos luminosos (Md de la Fig. 2a) que viene de la moneda a nuestro ojo derecho y sustituyámoslo por un mazo de rayos luminosos (M'd) que sería emitido por la punta de un lápiz. Podemos hacerlo con dos espejos (Es1 y Es2). La imagen de la moneda en la retina del ojo derecho (Md) será cambiada por la imagen del lápiz (M'd) y la impresión nerviosa (Nd) de la moneda por la impresión nerviosa (N'd) del lápiz.

La imagen cerebral entonces estará constituida por una imagen plana y monocular de la moneda (Ci) superpuesta por una imagen también plana y monocular del lápiz (C'd). Si el lápiz se mueve, experimentaremos una imagen cerebral que consta de dos partes, una de las cuales (C'd, que corresponde al lápiz), cambia de posición con referencia a la otra (Ci, relacionada con la moneda). El lápiz puede ser manejado en forma tal que la parte móvil (lápiz) de la imagen cerebral (C'd) describa subsecuentemente los contornos de la parte esta-

cionaria (moneda = Ci). Cuando el lápiz, visto con el ojo derecho, se deja en contacto con el papel, describirá los contornos de la moneda, que es observada con el ojo izquierdo.

Lo que realmente vemos, a causa de la proyección mental de toda la imagen cerebral en conjunto, es que un lápiz plano, no estereoscópico, toca y dibuja los contornos de una moneda plana.

Una explicación similar se aplica para aclarar el experimento del estereoscopio y la moneda de la Fig. 1. Ningunas diferencias esenciales son introducidas por los lentes del estereoscopio. Los ojos no se acomodan para la distancia entre la moneda y los ojos, sino para una distancia infinita y los ejes de los ojos serán paralelos. Una intervención con espejos no es necesaria porque el lápiz y la moneda están ya separados por el estereoscopio. Según el autor, la situación debe representarse esquemáticamente como en la figura 2c y no como en la figura 1, la cual expresa la opinión de v. F. D.

La correlación de las imágenes de los ojos izquierdo y derecho, como sucede con la reproducción de un objeto, visto con el ojo izquierdo y reproducido por medio del ojo derecho, es probablemente efectuada por un último proceso cerebral. Esto puede ocurrir solamente en esa parte de nuestro cerebro donde las impresiones del ojo derecho e izquierdo son juntadas y experimentadas psicológicamente como visión. No tenemos sino un solo centro de atención consciente donde todas las impresiones son reunidas, y esto parece ser la única base real para la explicación del “experimento No. 3” de v. F. D.

III—INVESTIGACION DEL LAZO ENTRE CONVERGENCIA Y ACOMODACION

El “experimento No. 4” de von Frijtag Drabbe, el del estereoscopio y la moneda, se presta para investigar la conexión que existe entre la convergencia y la acomodación, si introducimos algunas modificaciones que se describen en seguida.

En primer lugar retornemos una vez más a la visión binocular de la vida diaria. Queremos acen-
tuar que al mismo instante en que convergimos los ejes visuales hacia un objeto, acomodamos también los lentes oculares para la distancia correspondiente. Esto lo hacemos subconsciente o automáticamente, sin algún esfuerzo. Las diferentes reacciones de los músculos, envueltos en este acto, están *acoplados*, de modo que a la acomodación para una cierta distancia D corresponde un ángulo de convergencia γ , bien definido y directamente relacionado con la distancia D . Esta relación entre convergencia y acomodación, presentada gráficamente en la Fig. 4, está regida por la ecuación:

$$\tan \frac{1}{2} \gamma = \frac{\frac{1}{2}E}{D} \quad 1)$$

en la cual D es la distancia entre objeto y ojos, E la separación de los ojos.

Así, cuando miramos con los ojos de una manera tal que la relación de D , E y γ esté de acuerdo con la ecuación 1) tenemos la sensación que observamos “confortablemente”, “fácilmente”, “normalmente” y “sin esfuerzo”.

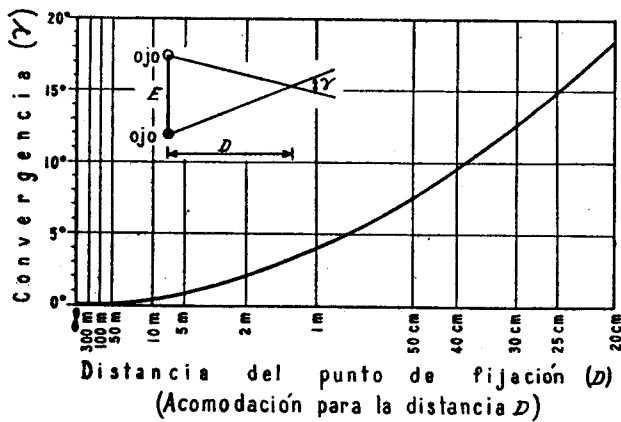


Fig. 4.—Relación entre acomodación y convergencia (γ).

Esta es la manera como vemos normalmente en la vida diaria. Si utilizamos ciertos instrumentos podemos apartarnos de la vista normal, es decir, de la ecuación 1), y éste es, especialmente, el caso cuando examinamos un par de estereogramas.

Si nos desviamos de esta regla, p. e., si observando introducimos un ángulo de convergencia γ , que no pertenece a la acomodación correspondiente de acuerdo con la ecuación 1), tenemos la sensación de que miramos forzada y no naturalmente, lo que

causa una fatiga extraordinaria ya después de un corto tiempo. Esto por ejemplo sucede cuando estudiamos un par de fotografías estereoscópicas con los ojos desnudos.

Ahora llevemos a cabo los siguientes *experimentos adicionales con la moneda y el estereoscopio de bolsillo*:

1. Ponga las patas del estereoscopio como se muestra en la Fig. 5a.
2. Ponga una moneda debajo del ojo izquierdo y marque su margen izquierdo en el papel bajo el ojo derecho.
3. Mida la distancia entre esta marca y la margen izquierda de la moneda, la cual el S_1 .
4. Ponga las patas en la posición de la figura 5b y marque nuevamente el sitio que corresponde al lado izquierdo de la moneda.
5. Mida nuevamente la distancia entre el margen izquierdo de la moneda y la segunda marca, la cual será llamada S_2 .

Se encontrará ahora que S_1 es más largo que S_2 .

La explicación de esta diferencia no es difícil después de nuestras deducciones previas en relación con la visión normal binocular. Los estereoscopios de bolsillo están contruídos generalmente en una forma tal que la distancia entre los lentes y la superficie de la mesa sea aproximadamente igual a la distancia focal del sistema óptico cuando es usado

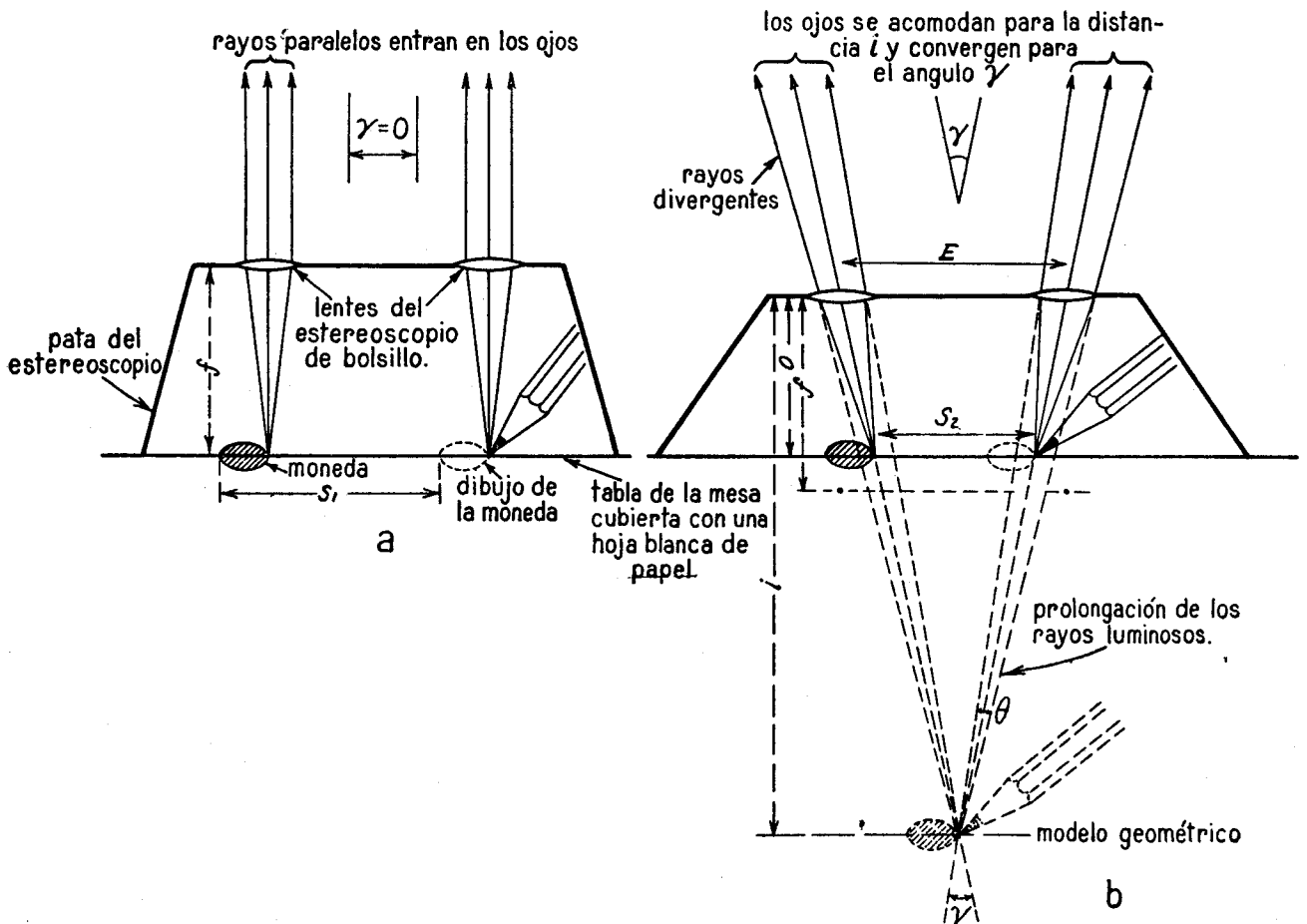


Fig. 5.—Experimento adicional con el estereoscopio de bolsillo y la moneda.

como se indica en la figura 5a. Los rayos divergentes que cada punto material de la moneda (o la punta del lápiz) emite, son transformados por los lentes del estereoscopio en rayos paralelos que entran a nuestros ojos. Estos se acomodarán para el infinito, y los ejes de los ojos serán mantenidos paralelos en forma correspondiente a este estado de acomodación según la ecuación 1). La distancia S_1 de un modo general será igual a la base visual E .

En el segundo caso tanto la moneda como el lápiz están separados de los lentes del estereoscopio por una distancia que es menor que la distancia focal (f) de los lentes. De acuerdo con las bien conocidas leyes de la óptica, entrarán a los ojos rayos divergentes que parecen venir un punto situado entre el infinito y f (distancia i de la imagen virtual).

Los ojos se acomodarán ahora para esta distancia y los ejes de los ojos convergirán formando el ángulo correspondiente. Como resultado, la distancia S_2 será más corta que S_1 .

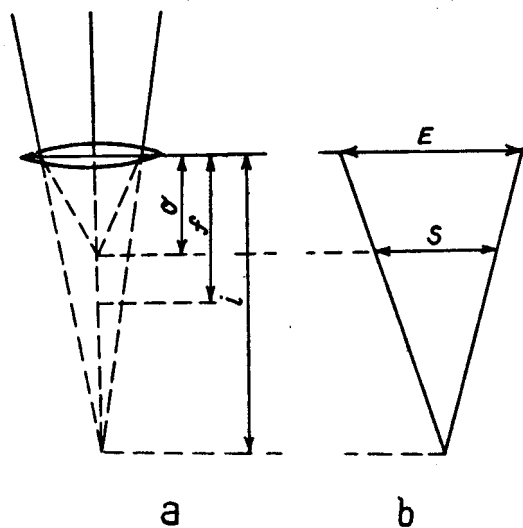


Fig. 6

Esta distancia S de separación puede ser determinada matemáticamente. De acuerdo con la ecuación para lentes delgadas, tenemos (Fig. 6a.):

$$\frac{1}{i} - \frac{1}{o} = \frac{1}{f} \quad \text{de donde} \quad i = \frac{of}{f-o} \quad 2)$$

en la cual i es la distancia de la imagen virtual, o la distancia del objeto, tomadas ambas positivamente si ellas se miden debajo de las lentes del estereoscopio en dirección a la mesa; f (la distancia focal de las lentes) es tomada positiva para las lentes positivas que se usan en los estereoscopios. Los ejes de los ojos se dirigen a un punto a la distancia i , donde se encuentra la imagen virtual de los lentes. Así, de acuerdo con la Fig. 6b, podemos deducir por similitud de triángulos:

$$\frac{E}{S} = \frac{i-o}{i}$$

o sustituyendo para i el valor obtenido en 2)

$$S = \frac{o}{i} \cdot E \quad 3)$$

Podemos comprobar en una forma práctica con cuanta aproximación la visión binocular sigue la ecuación 3). Con este propósito usamos un estereoscopio de lentes Abrams que permite separar o juntar los lentes. La moneda fue puesta bajo el estereoscopio sobre pequeños tacos de madera de diferentes espesores para cambiar la distancia (o) entre el objeto y los lentes. La separación S fue medida varias veces para la misma distancia (o) del objeto. Estas lecturas se dividieron por la base ocular (E), y los valores de la separación S , expresados de esta manera en porcentajes de la base E , se colocaron en el gráfico de la Fig. 7 (puntos gruesos).

La línea gruesa y continua representa la ecuación 3) incluyendo las correcciones 1 y 2 que se explican en seguida. Es decir, que la línea indica qué valores de la separación S corresponderían a las distancias i si la relación entre convergencia y acomodación fuera completamente invariable y rígidamente determinada por la ecuación 3). Las mencionadas correcciones aplicadas a la ecuación 3) son las siguientes:

1. Cuando el ángulo de convergencia se agranda, la base visual E debe reducirse. Como los globos de los ojos tienen un diámetro medio de 24 mm, la distancia efectiva entre las pupilas no será la misma para diferentes ángulos, ya que las pupilas rotarán alrededor de estas esferas.

2. Las pupilas están un poco separadas de los lentes del estereoscopio. La distancia entre la imagen virtual y el ojo es ligeramente más grande que i en la Fig. 6.

Es importante que solamente las partes centrales de las lentes sean usadas, porque mirando por las márgenes de las lentes, los rayos luminosos serán desviados (refractados) como en un prisma. (Para este efecto, vea la Fig. 10, página 528, estereoscopio de lentes, en la segunda edición del "Manual of Photogrammetry"⁶). Por consiguiente, la separación de las lentes debe ser cambiada de acuerdo con los hechos expuestos bajo los numerales 1 y 2.

La Fig. 7 muestra que aunque los datos obtenidos se desvían considerablemente de los valores teóricos, en las observaciones hay una tendencia general para seguir la ecuación 3).

(6) Las leyes que gobiernan la óptica de las lentes nos enseñan que rayos luminosos convergentes que vienen de un punto, situado a una distancia aproximadamente igual a la distancia focal de las lentes, emergen paralelamente (vea la Fig. 5a). La separación adicional de las fotografías, causada por el efecto de la refracción de las lentes como en un prisma, puede como máximo corresponder al diámetro de la lente. Este fenómeno contribuye a una separación **adicional** de las copias, si las partes marginales de la lente, muy cerca a la nariz, son usadas. No ocurren desplazamientos por refracción prismática si solamente utilizamos la parte central de las lentes, y el desplazamiento óptico reduce la separación si miramos por las partes marginales de las lentes al extremo derecho e izquierdo del estereoscopio. Las ventajas de una separación adicional por la refracción del prisma, como regla, puede ser obtenida solamente con estereoscopios que tienen lentes ajustables.

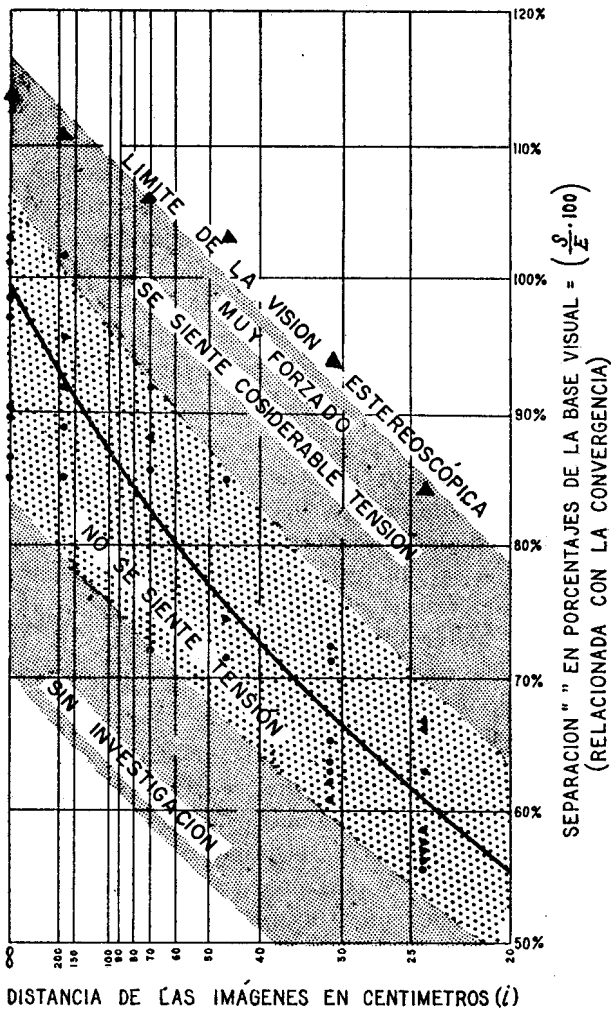


Fig. 7.—Gráfico de los resultados de los experimentos adicionales y complementarios con la moneda y el estereoscopio de bolsillo. Muestran que la convergencia y la acomodación están acopladas pero muy flojamente. Ejemplo: cuando los ojos se acomodan para 70 cm. la convergencia, lo mismo que la separación relacionada (S , vea las figuras 5b y 6) puede variar desde 72% a 92% de la base visual sin violentar mucho los ojos. La estereoscopia es perdida si la separación se aumenta hasta el 106% de la base visual. También podríamos leer el gráfico de otra manera: Los ojos pueden variar de acomodación para distancias entre 25 y 60 cm. sin forzar la vista cuando la convergencia se mantiene a 70% de la base visual. En este gráfico el ángulo de convergencia no se puede leer en grados.

La relación entre convergencia (γ) y acomodación, como está expresado por el gráfico de la Fig. 4, parece existir aun cuando la conexión no es muy rígida.

Este no es un nuevo descubrimiento, ya que varios investigadores han llegado a las mismas conclusiones, aun cuando suponemos que siguieron diferentes vías. Estamos de acuerdo con las conclusiones de von Tschermak-Seysenegg (pág. 174) quien resume el fenómeno en la siguiente forma: *"para cada estado de convergencia existe cierto campo de posibilidades de acomodación, y para cada estado de acomodación podemos variar el ángulo de convergencia dentro de ciertos límites. La conexión entre los dos fenómenos varía individualmente y cambia con la edad"*.

Completaremos nuestro experimento en la siguiente forma: en vez de usar una moneda bajo un ojo y un lápiz bajo el otro hagamos dos recortes de un par de fotografías aéreas estereoscópicas. Separemos en lo posible esos fragmentos que deben mostrar los mismos detalles.

Observaremos que podemos separar los recortes de las fotografías mucho más de lo que se pudieron separar la moneda y el lápiz. La imagen estereoscópica que vemos ahora es significativa y la concentración en ella, nos capacita para conseguir una separación considerablemente más grande que la distancia interpupilar. Las máximas separaciones obtenidas en este experimento complementario fueron dibujadas como triángulos en la Fig. 7; en el gráfico ellos definen la línea "límite de visión estereoscópica". Notaremos que una separación extrema, aparte de la tensión que sufren los ojos ya no nos permite observar los detalles con claridad. Nos hemos separado mucho de la relación de convergencia (γ) y acomodación expresada por el gráfico 4 y no podemos mantener esta convergencia (más apropiadamente: divergencia; γ tiene aquí un valor negativo) y acomodar apropiadamente al mismo tiempo. Este experimento prueba nuevamente que estos dos fenómenos no son independientes, sino que debe existir cierta asociación entre ellos.

IV—LA CONFUSION QUE CONCIERNE A LA IMAGEN TRANSMITIDA Y EL ESTEREO-MODELO CON LA VISION ESTRABICA.

Uno de los experimentos de von Frijtag Drabbe consiste en sostener dos fósforos o lápices I y D (ver la Fig. 8a.), digamos a una distancia igual a la del brazo extendido, frente a los ojos, con una separación aproximadamente igual a la base visual. Al fijar la vista en algo bastante retirado, los dos ojos verán cuatro imágenes, numeradas 1-4 en la Fig. 8a. La imagen número 1 es, de acuerdo con v. F. D., la imagen transmitida del ojo derecho al izquierdo y la número 4 la imagen transmitida del ojo izquierdo al derecho, mientras las imágenes números 2 y 3 pueden ser fundidas en una imagen que es la imagen estereoscópica.

Imaginémonos ahora algún plano de referencia (Pl. R., una pared por ejemplo) detrás de los fósforos marcados I (izquierdo) y D (derecho) en la Fig. 8b. y proyectemos el ojo izquierdo (i) y el derecho (d) sobre el plano de referencia. Id es la proyección del fósforo izquierdo (o lápiz) desde el ojo derecho, Id la proyección del fósforo izquierdo (o lápiz) desde el ojo derecho, Ii la proyección del fósforo izquierdo desde el ojo izquierdo, etc. Vemos en la Fig. 8b, que todas las cuatro imágenes (Id, Ii, Dd y Di) son "reales" y que nada es "transmitido" de un ojo al otro.

Si ponemos una estereo-cámara en la posición de nuestros ojos, y tomamos fotografías estereoscópi-

cas de los dos fósforos, también tendremos cuatro imágenes de fósforos; dos tomadas en la película con la lente izquierda y dos con la lente derecha.

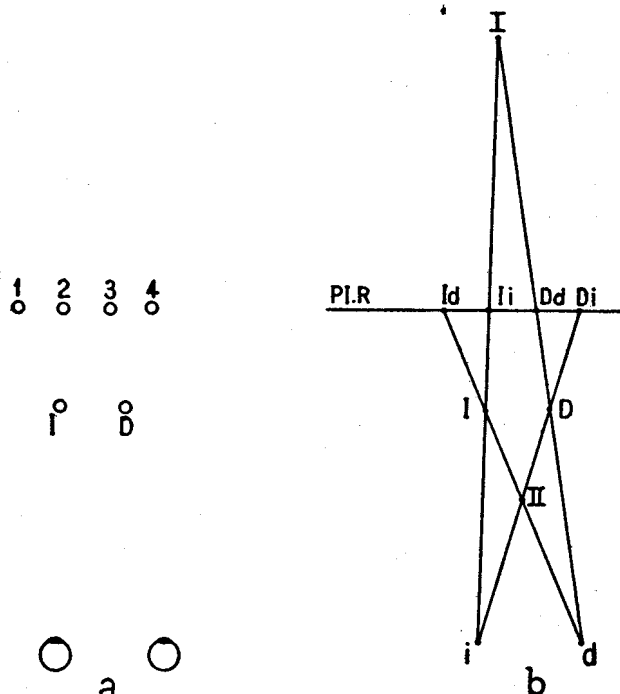


Fig. 8.—Análisis del "experimento de los fósforos" de von Frijtag Drabbe.

Las 4 imágenes Li, Dd, Id y Di pueden ser fundidas por parejas, como está indicado por las líneas que se intersectan en los números romanos I y II. I representa la fusión normalmente practicada por los fotointérpretes cuando examinan un estereopar sin instrumento. La fusión II es menos usada por lo general. Podemos suponer que todo intérprete está familiarizado con la imagen estereoscópica convencional que se obtiene por la fusión de Li-Dd, pero tal vez no es superfluo dar algunas indicaciones de cómo obtener una fusión por intermedio de Id y Di. Proponemos los siguientes pasos:

1) Tome un par de fotografías estereoscópicas, preferiblemente un juego que tenga una clara característica topográfica en común, por ejemplo un estanque y ponga esas fotografías en una mesa baja, aproximadamente a 50 cm. de los ojos. Se recomienda cortar aquellas partes de las fotografías que están fuera del recubrimiento del par estereoscópico, por que introducen molestias innecesarias al lector que ejecuta esta fusión por primera vez.

2) Ponga la fotografía que debería ser puesta al lado derecho para la visión normal estereoscópica, al lado izquierdo, de acuerdo con la Fig. 8b. (Fotografías en posición cruzada).

3) Sostenga un lápiz en la mano derecha más o menos en la mitad de la distancia entre los ojos y la mesa y mire verticalmente en dirección a la mesa.

4) Cierre el ojo izquierdo y mueva la fotografía que está debajo del ojo cerrado en una forma tal que el estanque sea visto bajo la punta del lápiz (en otras palabras: el ojo derecho, la punta del lápiz y el estanque deben estar en una línea recta). Abra el ojo izquierdo y cierre el derecho trasladando

después la fotografía que está debajo del ojo derecho hasta que el estanque parezca estar debajo del lápiz (alineé el ojo izquierdo, la punta del lápiz y el estanque).

5) Repita este procedimiento varias veces, manteniendo el lápiz y la cabeza sin moverlos hasta que las fotografías estén propiamente alineadas. (Los puntos centrales de las fotografías deben estar paralelos con la base visual).

6) Abra ahora ambos ojos al mismo tiempo; las dos imágenes del estanque en cada fotografía serán entonces fundidas y si la atención es cambiada de la punta del lápiz a las fotografías se verá entonces un modelo estereoscópico muy claro aproximadamente a la mitad de la distancia de la mesa a los ojos, aparentemente en el sitio donde el lápiz está sostenido. Este parece estar tocando el estereomodelo.

Podemos designar el modelo así obtenido aproximadamente en II como "estereomodelo con los ejes de los ojos cruzados" o "estereomodelo con visión estrábica".

De la Fig. 9, que es una ilustración de visión estereoscópica con los ejes de los ojos cruzados, podemos deducir por triángulos similares que:

$$\frac{E}{S} = \frac{m}{D-m} \quad \text{o} \quad m = \frac{E}{S+E} \cdot D \quad 4)$$

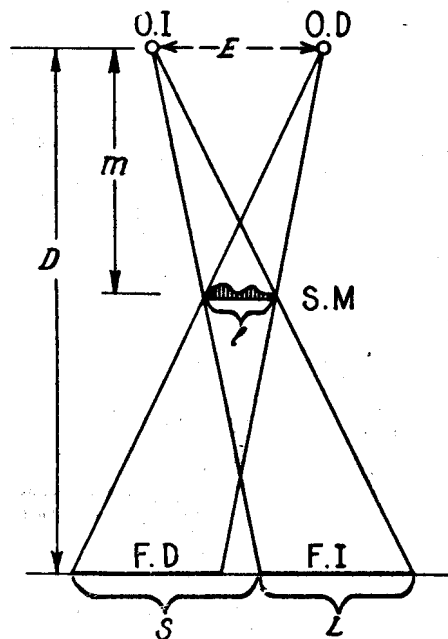


Fig. 9.—Diagrama de la visión estereoscópica de un par de fotografías con los ejes de los ojos cruzados. Abreviaturas:

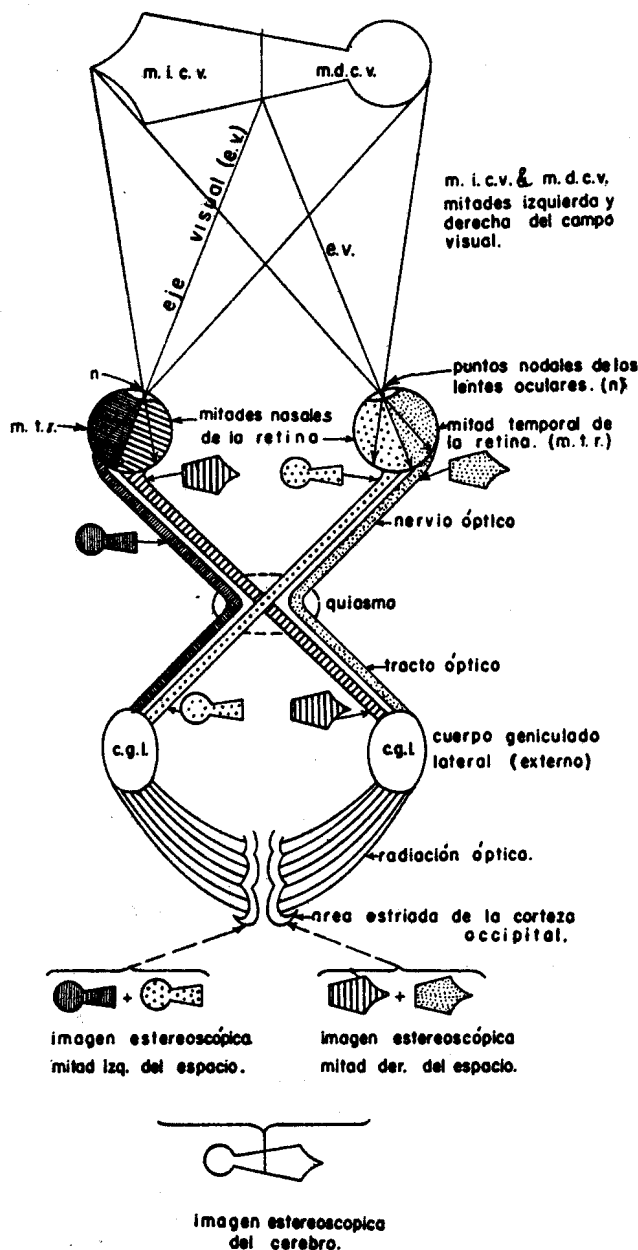
- O.I. y O.D., Ojo izquierdo y derecho.
- F.D. y F.I., Fotografías derecha e izquierda.
- S.M., Estereomodelo.
- I., Longitud del estereomodelo.
- L., Longitud de la parte correspondiente en la fotografía.
- S., Separación de las fotografías.
- m., Distancia de los ojos al estereomodelo geométrico.
- D., Distancia de los ojos a la mesa.
- E., Base visual o distancia interpupilar.

Esta ecuación 4) puede ser comprobada experimentalmente ya que el estereomodelo está al alcance y puede ser tocado por el lápiz. Si medimos las distancias D , S y m veremos que están de acuerdo con la ecuación 4). Sin embargo, esto no significa que veamos al estereomodelo a la distancia m , como lo supone la tesis de Wheatstone. Principios fisiológicos que serán descritos más adelante, mostrarán que esta tesis no es correcta en este caso y que nosotros no vemos o proyectamos el modelo a m . A primera vista todo esto parecerá más bien confuso ya que aparentemente hay contradicción. Este caso será aclarado en la Sección X.

V—CONSECUENCIAS DE LAS DISPOSICIONES ANATOMICAS DE NUESTROS OJOS Y CEREBRO

El cruce de las fibras nerviosas

Cada retina (Fig. 10) está dividida por un plano vertical, que pasa por la fovea, en dos mitades:



un hemisferio nasal y otro temporal. Las fibras nerviosas que salen de los hemisferios nasales, se cruzan en el quiasma en forma tal que "las impresiones nerviosas" que resultan de aquella parte de la imagen que cae en la mitad nasal del ojo derecho, son conducidas a través del centro primario de visión (cuerpo geniculado izquierdo) hacia la mitad izquierda de nuestro centro de visión (corteza occipital) junto con las impresiones nerviosas de la mitad temporal de la retina del ojo izquierdo. Las impresiones nerviosas del hemisferio nasal del ojo izquierdo y las mismas del hemisferio temporal del ojo derecho son similarmente conducidas a la mitad derecha de la corteza occipital⁷.

Así la fusión estereoscópica de las imágenes de la mitad izquierda del campo de visión, se realiza en la mitad derecha de la corteza y viceversa. La fusión estereoscópica de detalles inmediatamente adelante o atrás del punto de fijación, se efectúa entre las dos mitades de la corteza (el caso de los puntos A y B de Fig. 11a, vea más adelante). Esta peculiaridad puede ser responsable de la grande agudeza de la visión estereoscópica cerca al punto de fijación. Parece obvio que, aparte de lo que acabamos de mencionar, esta curiosa estructura anatómica no tiene influencia particular sobre la estereovisión y es claro que no admite la posibilidad de explicar el estereoscopismo con imágenes transmitidas, como lo quisiera von Frijtag Drabbe.

Correspondencia y no correspondencia de los puntos retinales

Y no sólo que se proyectan las mitades correspondientes de las retinas en la misma mitad del centro cerebral para visión, sino que ha sido comprobado que cada área de la retina (conos de la fovea o grupos de conos fuera de la fovea unidos por un nervio común) tiene una conexión definida con cierta parte del cerebro. Hay, por decirlo así, una proyección de punto por punto de las retinas al área estriada de la corteza occipital. Esos conos de la fovea o grupos de conos fuera de la fovea que están conectados (por dos fibras nerviosas de los ojos izquierdo y derecho) con la misma célula en el centro cerebral para la visión, son los puntos retinales correspondientes. Las fracciones de imágenes de cada par correspondiente de estos puntos son conducidas —proyectadas o sobrepuestas— a la misma célula cerebral.

Un objeto que forma imágenes en puntos retinales correspondientes es observado como un objeto simple. Doble vista o diplopia ocurre si las imágenes del objeto son proyectadas en puntos retinales no correspondientes o dispares, porque las impre-

(7) Algunos autores (Wilbrand, Sanger) han supuesto que el área foveal de la retina tiene una doble representación en la corteza occipital, es decir, que las impresiones de la fovea del ojo derecho deben ser conducidas a ambas mitades del centro cerebral para visión. Sin embargo, ha sido probado (especialmente por von Zsily, vea a von Tschermak - S., p. 179) que éste no es el caso.

Fig. 10.—Diagrama del cruce de los nervios ópticos en el quiasma.

siones nerviosas resultantes son conducidas a diferentes células del cerebro.

Si dirigimos nuestra atención al un punto P (Fig. 11a), acomodamos y convergimos correspondientemente de acuerdo con la localización en el espacio de P; una imagen clara de P será entonces formada en la parte central de la fovea de cada ojo y una síntesis de ambas imágenes, exteriorizada por proyección mental, será identificada por la mente con el punto P. Otros puntos como D, G y F, que están en el llamado horóptero (un círculo a través del punto de fijación P y los puntos nodales de los ojos) también son observados como objetos simples. Puntos fuera o dentro del horóptero tales como A, B y C, son sin embargo vistos como dobles imágenes, al menos mientras nuestra fijación es mantenida en el punto P. Como los centros de las foveas son puntos correspondientes, el horóptero circular indica que todos los puntos retinales correspondientes ocurren a la misma distancia angular de las foveas (ángulos $P'E'D'$, $PE'D$, $PE''D$ y $P''E''D''$ en la Fig. 11a son iguales). Como consecuencia los puntos correspondientes de la retina coincidirían si las retinas del ojo izquierdo y derecho pudieran ser puestas una sobre la otra con las foveas casadas⁸.

Las imágenes D' , F' , G' y D'' , F'' , G'' , corresponderán por pares (Fig. 11c). Este no será el caso para las imágenes A' , B' , C' y A'' , B'' , C'' , relacionada con los puntos A, B, C, que no están en el horóptero (Fig. 11e).

Las imágenes que vienen de ambos ojos son relacionadas por la mente, en el mismo instante de la observación, a un sistema egocéntrico del espacio, con el origen de las coordenadas en algún lugar intermedio entre los ojos. A este respecto, ambos ojos trabajan en conjunto como un solo órgano y pueden ser substituídos —para una mejor comprensión— por un *ojo ciclópeo o mental* (Em en la Fig. 11f) en medio de la frente que representa también el centro del sistema egocéntrico espacial.

Podemos imaginar las retinas de cada ojo transformadas en el ojo mental, después de hacerlas girar la mitad del ángulo de convergencia y en forma tal que los puntos retinales correspondientes coincidan. De esta manera van a coincidir también ambos ejes visuales⁹ formando una sola dirección hacia el punto P que estamos fijando con los ojos. Como las imágenes de las retinas están relacionadas por la mente con objetos del mundo exterior, proyec-

tamos también las imágenes del ojo mental hacia el exterior (Fig. 11f).

Para los puntos P, D, F y G, del horóptero de la Fig. 11a, los cuales forman imágenes en los conos correspondientes de la retina, encontramos direcciones comunes Em-D, Em-F, etc. en el espacio mental.

Tienen diferentes direcciones desde el ojo ciclópeo los puntos afuera o dentro del horóptero, que forman imágenes en conos dispares de la retina. (Direcciones Em-A', Em-A'', etc., en la Fig. 11f).

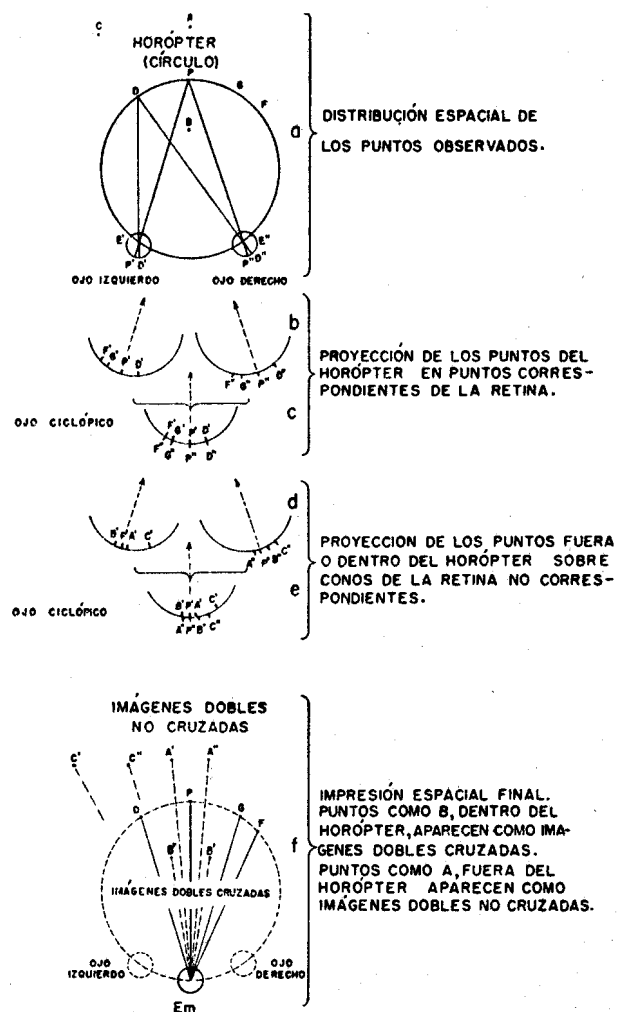


Fig. 11.—Explicación de las imágenes dobles mediante el concepto de los puntos retinales correspondientes.

El punto B dentro del horóptero es en esta forma experimentado como una imagen doble: B'', visto frente al ojo izquierdo, es la imagen proyectada desde el ojo derecho hacia afuera, y B', percibido frente al ojo derecho, es la imagen proyectada del ojo izquierdo hacia afuera. Así, B'', que corresponde a una imagen del ojo derecho desaparece cuando cerramos este ojo, de igual manera que B' se desvanece si cerramos el ojo izquierdo. Tenemos así una explicación para el experimento No. 3 de von Frijtag Drabbe y podemos comprender que la imagen de un ojo no es "transmitida a" ni "observada por" el otro ojo.

El fenómeno de las imágenes dobles no tiene nada que ver, como podemos observarlo ahora, con el ex-

(8) La situación en realidad es más complicada. El horóptero circular es una aproximación y por consiguiente puede ser llamada *horóptero teórico*. Los sitios donde los objetos no se ven dobles —para cierto punto de fijeza— se pueden también determinar experimentalmente. Constituyen entonces el *horóptero empírico*; es una línea de menor curvatura que un círculo. El horóptero, sin embargo, se extiende además en la dirección vertical hacia arriba y hacia abajo, así que podemos comparar el *horóptero espacial* con la superficie de un cilindro.

(9) El eje visual es la línea que une el punto nodal de la lente ocular con el centro de la fovea. Forma un ángulo de 3° a 7° con el eje óptico. Vea la Fig. 1, pág. 639, número 4, vol. XV, de "Photogrammetric Engineering".

perimento número 4 (estereoscopia y moneda). En este experimento, un detalle atentamente observado de la moneda proyectará su imagen en la parte central de la fovea del ojo izquierdo y la imagen estimulará partes completamente definidas del centro cerebral para la visión. La punta del lápiz tiene que estar puesta en un sitio tal que forme una imagen en la parte correspondiente de la fovea del ojo derecho, así que semejantes secciones cerebrales del centro de la vista pueden ser estimuladas.

Hay, sin embargo, muchas soluciones para lograr esto, de acuerdo con la localización del punto P en que hayamos fijado la mirada. Cuando la moneda y el lápiz están en el plano focal de los lentes del estereoscopio, los ojos se acomodarán para una distancia infinita y los ejes de los ojos se mantendrán paralelos, de acuerdo con este estado de acomodación. El lápiz y la moneda estarán entonces separados por una distancia E, igual a la base visual, por lo menos si continuamos mirando por la parte central de las lentes del estereoscopio.

Los experimentos en la Sección III, resumidos en la Fig. 7, prueban, sin embargo, que el acoplamiento de acomodación y convergencia no es muy rígido. Los ejes de los ojos pueden oscilar durante el proceso de dibujo desde una posición paralela hasta una pequeña convergencia o divergencia. Para mantener las imágenes de la punta del lápiz y los detalles de la moneda en puntos correspondientes de la retina, aumentaremos o disminuirémos, según corresponda, la separación entre el lápiz y la moneda. La consecuencia es que dibujaremos la circunferencia de la moneda como un óvalo o que no volveremos al mismo lugar donde comenzamos cuando se ha seguido toda la periferia con el lápiz. Por estas razones, la reproducción exacta de la moneda no será tan fácil como parece a primera vista.

De la figura 11 podemos aprender además que los puntos materiales dentro del horóptero se ven como imágenes dobles cruzadas, mientras que los puntos fuera del horóptero aparecen dobles pero no cruzados como fue notado también por von Frijtag Drabbe. La separación de las imágenes dobles es proporcional a la distancia de los puntos materiales desde el horóptero, esto es, las imágenes dobles B' y B'' pueden ser unidas cuando el punto P en donde fijamos la mirada es desplazado a B.

La ley de los puntos retinales correspondientes, no es sin embargo muy estricta. La mente puede, según parece, no sólo fundir fracciones de las imágenes que están superpuestas en las mismas células cerebrales sino que también es capaz de combinar fracciones de imágenes en las cercanías de ellas. O refiriéndonos a las imágenes retinales, también podemos decir: una imagen proyectada en un cono D' del ojo izquierdo no sólo puede hacerse fundir con el cono correspondiente D'' del ojo derecho sino también con otros conos individuales en la inmediata vecindad de D'', es decir con los que ocupan una pequeña área alrededor de D'' (la llamada *área de Panum*). Esta área tiene un diámetro aproximado de 7 minutos de arco¹⁰, que corresponde a 7 conos, más o menos, en el área de la fovea.

El fenómeno de Panum es aparentemente de fundamental importancia para la estereovisión, aun cuando el autor no ha encontrado esta conexión mencionada explícitamente en la literatura. El fenómeno prueba que ciertas relaciones pueden exis-

tir entre una cantidad limitada de conos *individuales no correspondientes*, aun cuando en un sentido restringido. Una instantánea impresión tridimensional es posible solamente si se logra la fusión de imágenes retinales entre ciertos límites de disparidad y cuando se puede interpretar mentalmente esta disparidad en su propia significación, que es: tridimensionalidad. Podemos dar la siguiente interpretación a las *áreas de Panum*: el punto A en la Fig. 11a. será visto en una unidad tridimensional con los puntos D, P, G y F sobre el horóptero si las disparidades de las imágenes de A sobre la retina (para este punto P de fijación de la mirada) están dentro de los límites de los círculos de Panum. La limitada disparidad dentro del área de Panum es interpretada por la mente como dimensionalidad, plasticidad o tercera dimensión. Llamaremos a esta actividad de la mente "*actividad de Panum*".

Así, en realidad, debemos añadir en cada lado del horóptero una zona de cierta profundidad, definida por los círculos de Panum, en la cual se hace posible la estereovisión por la actividad de Panum sin cambiar el punto de fijación de nuestra mirada.

Resumimos entonces: para los objetos cerca del horóptero, pero dentro de la zona mencionada, la magnitud de disparidad o no correspondencia es relativamente pequeña e interpretada como profundidad estereoscópica. Objetos, o partes de ellos, algo menos cercanos al horóptero pueden ser observados estereoscópicamente sólo cuando cambiamos el punto de fijación de la mirada que los traerá dentro o muy cerca, del nuevo horóptero.

Que el concepto de los puntos retinales correspondientes no es solamente una interpretación teórica sino que tiene un fundamento fisiológico real se comprueba por ejemplo en aquellos casos en que los músculos de un ojo son total o parcialmente paralizados o que por alguna circunstancia no funcionan correctamente. Doble vista o diplopía resulta cuando la imagen no se puede hacer caer en puntos correspondientes. Después de algún tiempo la imagen doble es cancelada, ya sea por un ignorar psíquico (supresión) de las impresiones del ojo defectuoso o por la reevaluación de los puntos retinales, formación de una nueva, pseudo fovea o falsa mácula, es decir: la creación de una nueva correspondencia. En el primer caso, la vista estereoscópica queda perdida, pero en el segundo caso puede restaurarse nuevamente. En las personas nacidas con estrabismo, la reacción para eliminar doble vista ya tuvo lugar muy temprano en la vida. Pero, sin embargo, si una intervención quirúrgica se lleva a cabo para colocar el ojo defectuoso en su posición correcta, ocurrirá el fenómeno de diplopía, pero éste es generalmente temporal.

El efecto de diplopía puede ser experimentado moviendo el globo del ojo ligeramente fuera de la posición normal. Esto se puede conseguir presionando muy ligeramente con un dedo el párpado en su esquina exterior (temporal).

(10) Landois-Rosemann. La cifra de von Tschermak-Seysenegg de 7 grados de arco mencionada en la pág. 105, segunda edición, debe ser un error de imprenta.

AGUDEZA ESTEREOSCOPICA Y EL INFINITO FISIOLÓGICO

La estructura granular de nuestras retinas pone cierto límite a nuestra capacidad de percepción, de lo cual podemos darnos cuenta cuando trabajamos con el estereómetro o cuando miramos objetos muy alejados.

Para apreciar claramente la profundidad estereoscópica entre 2 puntos, por ejemplo: B y P en la Fig. 11a, se supone generalmente que sus imágenes deben caer en 2 conos separados, no conectados por un nervio común. Esto significa en nuestro ejemplo que las distancias B'-P' y B''-P'' en la figura 11d, deben, como un mínimo, ser iguales a la separación interconal en el área de la fovea. Si éste es el caso, el punto B debe ser visto estereoscópicamente en frente de P, pero de cualquier punto Q entre B y P no podemos determinar con certeza si cae tan lejos como B o como P o si está entre B y P.

Si suponemos que los ejes visuales de la Fig. 11a se giran hasta quedar paralelos, el punto P estará infinitamente alejado. La distancia del punto B, que forma un triángulo isósceles con los puntos nodales de los ojos, representará el infinito fisiológico para la visión estereoscópica, porque cualquier punto ligeramente más alejado parecerá tan lejano como el punto infinito P.

La distancia entre dos conos en la parte central de la fovea, es aproximadamente 4 micrones, la cual corresponde más o menos a un ángulo de un minuto. El infinito fisiológico basado en este ángulo puede ser determinado como 110 m.¹¹

Esto concierne solamente a la estereovisión primaria; otras características secundarias tales como la obstrucción del fondo por objetos más cercanos, propiedades de la perspectiva, etc., que sirven como medios adicionales para determinar las distancias relativas entre los objetos, es claro que son aún válidas para largas distancias.

Con relación a la acomodación del ojo, el infinito fisiológico es aún más cercano. Como la capa fotosensitiva de la fovea tiene un espesor de 0.06 mm. solamente¹², podemos determinar con la ecuación de los lentes, aplicada ya en la Sección III, que un objeto a una distancia de 6.7 m del ojo formará una imagen a 20.06 mm. del punto nodal del ojo reducido (teórico, medio o común) si los rayos del

infinito forman una imagen a 20 mm. Podemos deducir, por consiguiente, que esos objetos que están desde 7 m. aproximadamente hasta el infinito se proyectarán claramente en la retina y que ninguna acomodación apreciable tendrá lugar para objetos que están más lejos de 7 m.

Concluyendo podemos decir que no existe un infinito geométrico (en el sentido Euclidiano) para el ojo humano, y que el infinito fisiológico se encuentra a una distancia relativamente corta.

VI—LA CORRELACION DE LAS IMPRESIONES VISUALES MENTALMENTE PROYECTADAS CON EL ESPACIO FISICO

Una clara distinción debe ser hecha entre el carácter tridimensional o "plástico" de una impresión visual y su localización en el espacio. El primer aspecto mencionado fue explicado por cierta magnitud de disparidad en las imágenes de la retina en combinación con la "actividad de Panum" de la mente. Necesitamos aún encontrar la razón por la cual esta impresión visual le confiere a un objeto su propio lugar en el espacio. En otras palabras: necesitamos saber en donde parece estar localizado el modelo estereoscópico, mentalmente proyectado hacia afuera.

Los objetos en los cuales nosotros fijamos nuestra atención siempre son proyectados en el mismo lugar de la retina, es decir, en la depresión foveal de la mácula y las estimulaciones producidas por las imágenes en las fibras nerviosas son siempre conducidas a las mismas células del centro cerebral para la visión, sea que estos objetos se encuentren muy cerca o muy alejados. En consecuencia no podemos atribuir un sentido telemétrico a las celdas individuales del cerebro. La reconstrucción de la percepción egocéntrica del espacio por medio del ojo ciclópeo en la figura 11f solamente explica en cuál dirección son percibidos los objetos, pero no nos da ninguna clave para encontrar la distancia. No es de extrañar que se haya conectado la sensación óptica para la distancia con la convergencia de los ejes oculares. Generalmente se supone que esta sensación es obtenida por una cierta tensión en los músculos¹³ que hacen girar los ojos hacia el punto de fijación ("recti interni") y ésta parece ser una base fisiológica para la visión estereoscópica. Esta sensación para la distancia tiene que depender probablemente de la sensación tensional de los músculos en el estado de contracción y no en

(11) Un efecto estereoscópico aceptable se obtendrá tal vez cuando miramos a los puntos en una forma imperceptiblemente asimétrica, p. e., en forma tal que P y B estén en los ejes visuales del ojo derecho. Las imágenes P' y B'' estimulan entonces el mismo cono, mientras B' y P' están separados por una distancia interconal. La zona de visión estereoscópica en este caso será extendida a 220 mts. Las personas con vista extremadamente buena (conos densamente distribuidos), pueden ver estereoscópicamente hasta 1.300 m. en óptimas condiciones (Von Tschermak-Seyse-negg, p. 124).

(12) Landois-Rosemann. Las células de los conos varían entre 28 a 85 micras en longitud, de acuerdo con Best y Taylor.

(13) Alguna comparación puede ser hecha con observaciones estereo-palpables, es decir, el reconocimiento tridimensional de la forma de los objetos por el tacto, por ejemplo con los dedos de la mano entera cuando los ojos están cerrados. Adicionalmente, las sensaciones musculares en los dedos, manos o brazos, son aquí de gran importancia. Podemos comprender después de un momento de reflexión que la interpretación de la forma de los objetos no puede depender solamente de la estimulación de los receptores cutáneos, sino también de la posición, distancia relativa, etc. de los dedos, es decir, que las sensaciones musculares son factores complementarios decisivos. M. Sahli, p. 189.

el estado de relajación como también lo cree von Tschermak-Seysenegg (op. cit. págs. 144-145). Conscientemente no percibimos la sensación muscular en sí misma, pero ella está subconsciente y directamente conectada con la localización en el espacio del objeto fijado.

Con relación a esta sensación, podemos tener principalmente dos opiniones. De acuerdo con la primera no habrá tensión muscular si suponemos que los músculos oculares (recti interni) están en *estado de completo descanso* teniendo paralelos los ejes visuales (Fig. 14, curva 1a). Y según la otra opinión podemos suponer que en este caso están en equilibrio, es decir, que la tensión de los músculos que hacen divergir los ojos ("recti externi") es igual a la tensión de los músculos que hacen converger los ojos ("recti interni"). La posible consecuencia de la segunda opinión sería entonces que la sensación muscular telemétrica pudiera extenderse a la visión divergente (Fig. 14, curva principal 1).

La tensión muscular es mayor para los puntos de fijación cercanos de acuerdo con el gran ángulo con que los ojos deben girarse fuera de su posición de descanso (o de equilibrio) y disminuye muy rápidamente cuando el punto de fijación se aleja: a 26 m. tendrá 1/100 del valor que tiene para la distancia normal de lectura (25 centímetros), si suponemos que la tensión muscular es proporcional al ángulo sobre el cual el ojo se ha girado.

Sin embargo, es claro que nuestra sensación de lejanía y cercanía no depende sólo de este principio, sino que es el resultado de varios factores determinantes.

A este respecto podemos presentar los siguientes principios:

PRINCIPIO 1.—*La sensación muscular que pertenece a la convergencia cuando se fija un objeto.* Esta sensación tiene una máxima intensidad a la distancia mínima de visión clara, pero se vuelve muy leve a una distancia relativamente corta. (30 a 100 m? Vea la Fig. 13).

Factores monoculares. Alguna estimación de la distancia puede ser obtenida en la visión monocular. Podemos distinguir dos principios diferentes:

PRINCIPIO 2a.—*La sensación muscular causada por la acomodación.* Para ver nítidamente objetos colocados a diferentes distancias de los ojos se requiere una reacción apropiada de los músculos de acomodación, y la sensación del esfuerzo correspondiente puede ser directamente relacionado con la distancia. La apreciación que se obtiene de este modo no es muy exacta y solamente es aplicable para objetos cercanos, como se infiere de los detalles explicados en el capítulo anterior (es decir no existe una acomodación perceptible para objetos a más de 7 m. de distancia). Ver figuras 12 y 13.

El principio 2a implica la posibilidad de que tengamos un sentir de la acomodación, comparable, en su valor telemétrico, al de la convergencia.

PRINCIPIO 2b.—*La experiencia con lupas.* La sensación de acomodación no puede ser el único medio monocular para la estimación de la distancia en el ojo humano. Esto puede ser fácilmente probado si observamos un objeto, por ejemplo nuestro dedo, a través de una lente de aumento. Es claro que el dedo aparecerá más grande, pero aparte de eso tendremos una impresión definida de su localización en el espacio. El hecho interesante es, que cuando estimamos la distancia del dedo a nuestro ojo como aparece bajo la lente de aumento, la distancia estimada resulta aproximadamente igual a la distancia real entre el dedo y el ojo. La manera adecuada de usar la lente de aumento es colocar el objeto en su plano focal, así que estén paralelos los rayos que salen de la lente y entran en el ojo. Este último se acomodará para el infinito de acuerdo con los rayos paralelos que recibe y los músculos

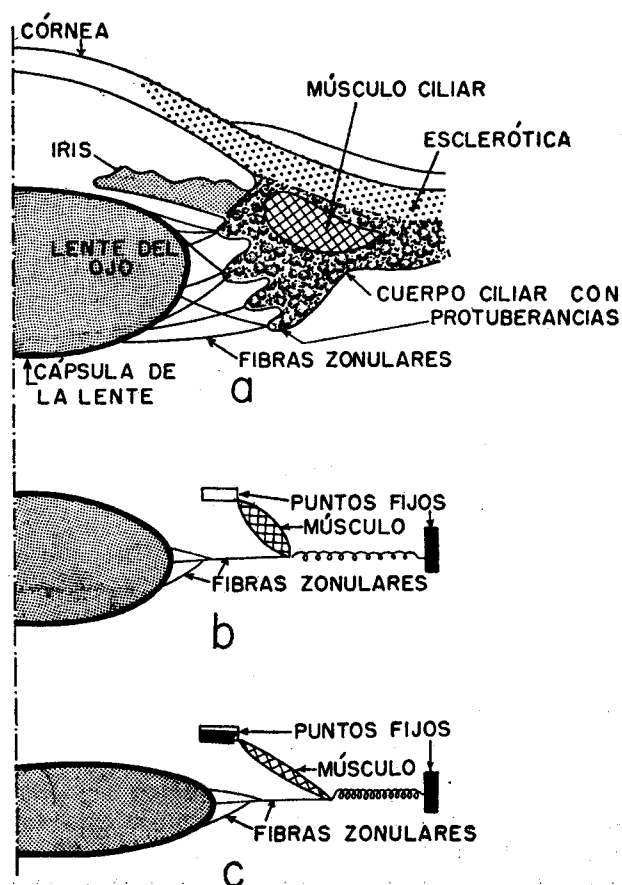
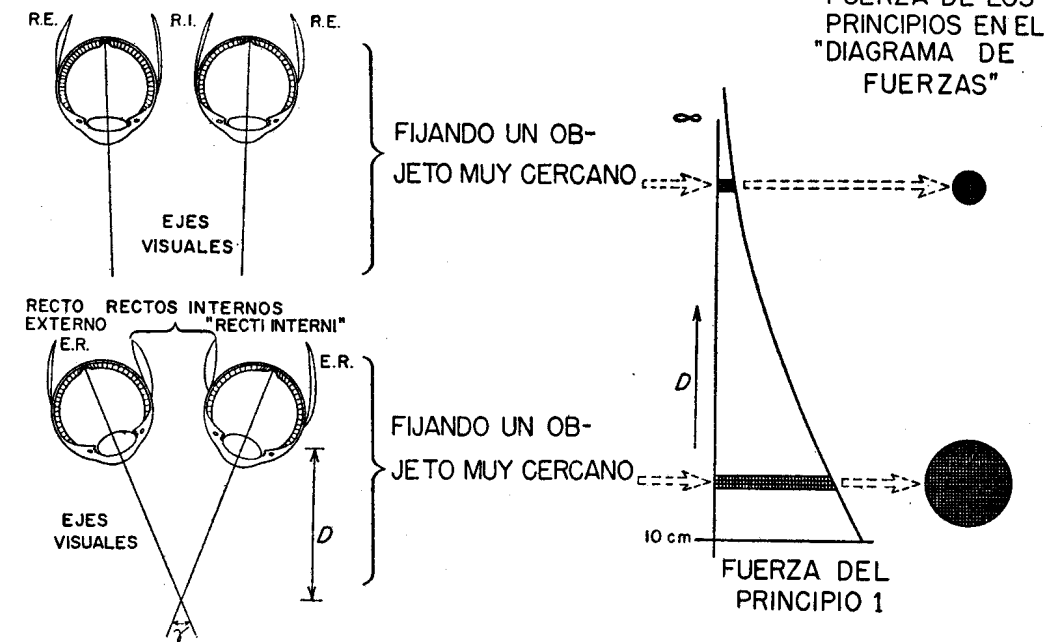


Fig. 12.—El mecanismo de acomodación. Una mitad de la sección a través del lente del ojo y de las regiones adyacentes. Para obtener una fotografía clara de un objetivo cercano, la cámara tiene que ser enfocada, es decir, el lente tiene que ser alejado de la película fotosensitiva. El ojo humano obtiene el mismo efecto por medios completamente diferentes: *cambios en la forma del lente por la acomodación.* El lente ocular está suspendido todo alrededor mediante fibras delgadas (fibras zonulares) adheridas a protuberancias del cuerpo ciliar.

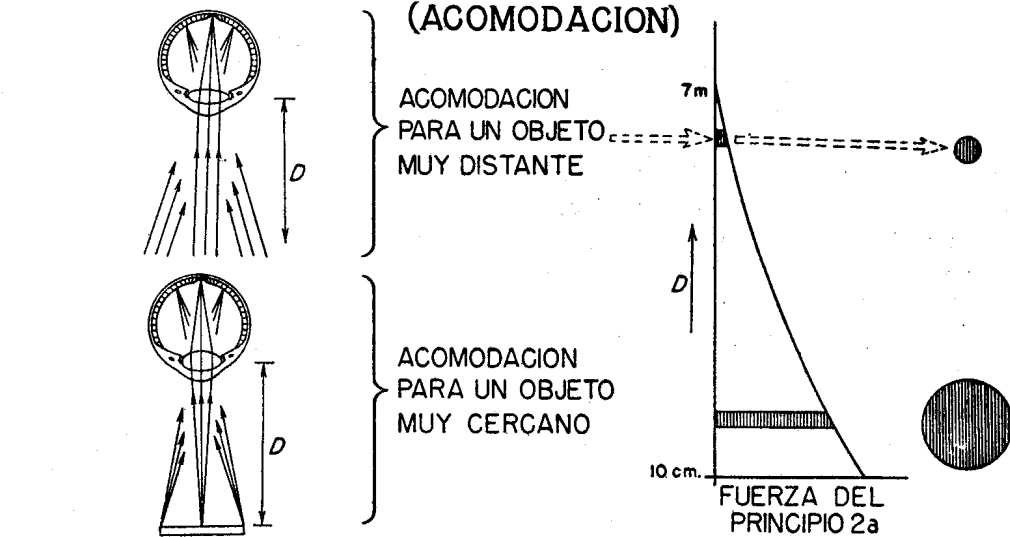
Para la visión cercana, el músculo ciliar, en forma de anillo, se contrae reduciendo el diámetro del anillo. El tejido elástico del cuerpo ciliar, representado por un resorte en b cede; las fibras zonulares son relajadas y el lente toma una forma más esférica por la elasticidad de la cápsula del lente. El poder refractivo del lente, entonces se ha incrementado. En la visión alejada fig. c) sucede lo contrario. La sensación muscular es entonces más fuerte para la visión de cerca, por la fuerte contracción del músculo ciliar.

Diagramas b) y c) de acuerdo con Best y Taylor.

PRINCIPIO BINOCULAR 1 (CONVERGENCIA)



PRINCIPIO MONOCULAR 2a (ACOMODACION)



PRINCIPIO MONOCULAR 2b (EXPERIENCIA DE LA LENTE DE AUMENTO)

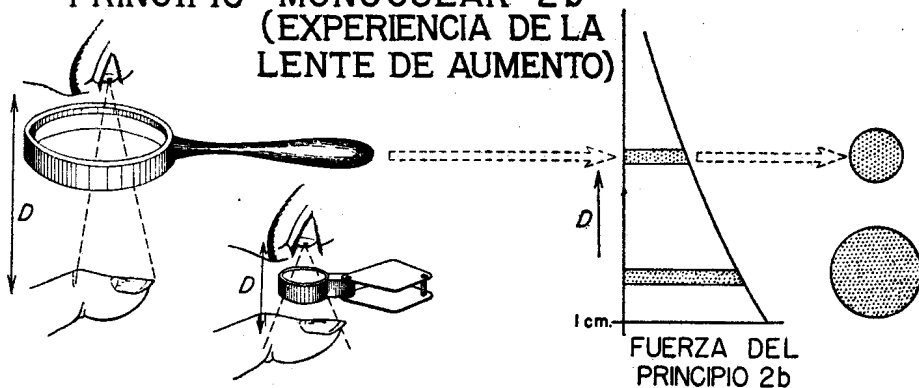


Fig. 13.—Diagrama para ilustrar las intensidades relativas de los principios 1, 2a y 2b para diferentes distancias. Su representación en los diagramas de fuerza, que se encuentran en las figuras 19 y 20.

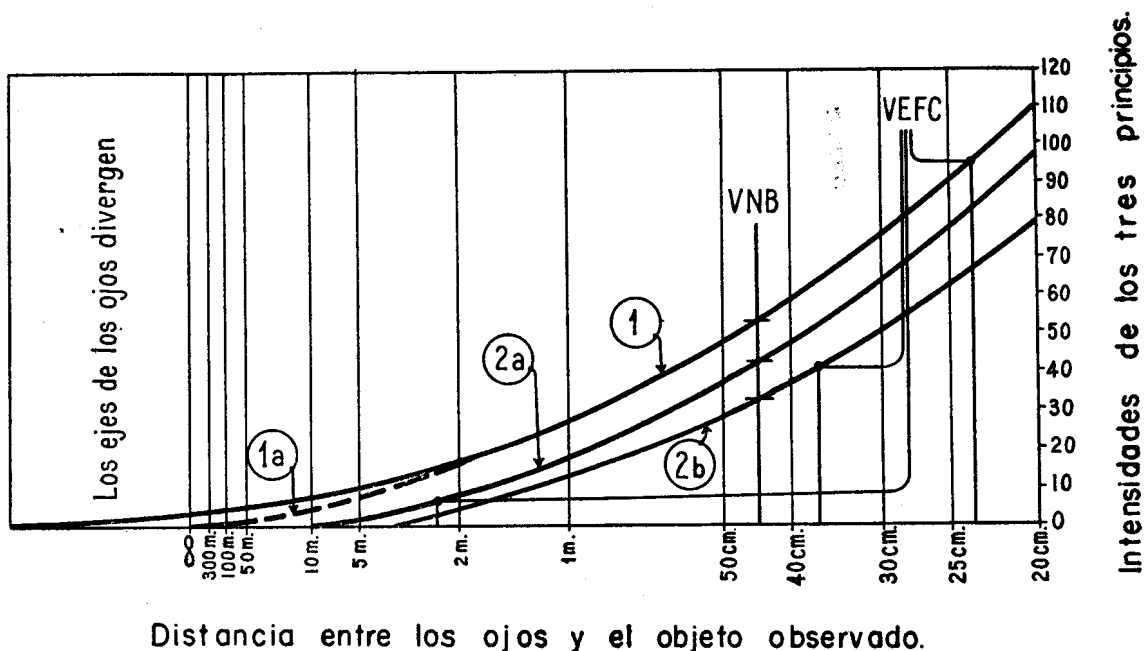


Fig. 14.—Probable variación con la distancia de los principios 1, 2a y 2b que localizan la imagen, mentalmente proyectada hacia afuera. Esta figura indica esquemáticamente cómo el autor piensa que estos principios funcionan.

VNB representa la situación de la visión natural binocular en un punto a 44 cm. de distancia. Los tres principios que determinan el lugar de la impresión visual, están todos en completa armonía y cada principio, por sí mismo, colocaría la imagen a 44 cm.

VEFC ilustra el caso 1 de la figura 20, visión estereoscópica fuertemente convergente con un estereoscopio de espejos. Los tres principios tienen ahora tendencias conflictivas: el principio 1 colocaría la imagen a 24 cm., los principios 2a y 2b a 3 m. y 38 cm., respectivamente. Las intensidades son, sin embargo, en el mismo orden; 95, 7 y 40 unidades y las influencias de estos principios sobre el sitio de impresión visual es proporcional a estos valores. La estereo-imagen será así localizada a 28 cm. a causa de la relativa fuerza del principio 1.

de acomodación permanecerán en estado de reposo. En vez de ver el dedo a gran distancia como deberíamos esperar según el Principio 2a, lo vemos colocado en el plano focal de la lente de aumento. Esto prueba que debe existir un medio monocular de estimación de distancias que es independiente del músculo de acomodación. El fenómeno es muy claro en sí mismo, pero el autor no ha encontrado ninguna referencia en la literatura¹⁴. Vea la Fig. 13.

PRINCIPIO 3.—*Las imágenes dobles* y la separación entre ellas influyen también en la estimación de la distancia del objeto fijado por nuestra mirada. La configuración de las imágenes dobles es completamente diferente si fijamos objetos lejanos o cercanos (vea Fig. 15). La separación de las imágenes dobles tiene una relación definitiva con la distancia entre los objetos y el punto de fijación. Aun cuando no nos demos cuenta de esas imágenes dobles en la vida diaria (a causa de la supresión psicológica) ellas permanecen presentes subconscientemente y contribuyen a nuestra estimación del espacio.

PRINCIPIO 4.—*Factores secundarios no estereoscópicos* como perspectiva, tamaño relativo, obstrucción del fondo (objetos cercanos que cubren partes de objetos más alejados) incremento de la bruma con la distancia, relación entre los objetos y sus sombras, etc. Estas características secunda-

(14) No tengo facilidades de consultar las obras apropiadas. Los lectores que estén en condiciones más favorables son invitados para aclarar este punto.

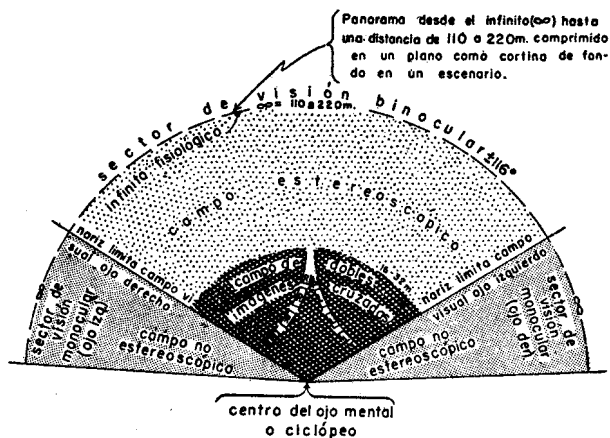


Fig. 15a. — Diagrama de la impresión del espacio cuando se fijan objetos infinitamente alejados.

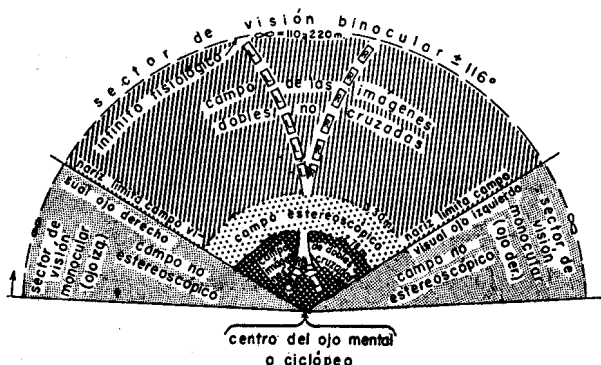


Fig. 15b.—Diagrama de impresión del espacio cuando se fija un objeto a tres metros de distancia. L y R: representación esquemática de imágenes dobles que pertenecen al ojo izquierdo y derecho respectivamente.

rias o empíricas están mencionadas en muchos libros, así que esta breve enumeración sea suficiente.

Los tres factores mencionados primero (1, 2a y 2b), son los principios fisiológicos reales de la estereoscopia; los otros (3 y 4) son pseudo estereoscópicos, es decir en realidad ellos son *deducciones* de la mente. Estas deducciones, o conclusiones, en general son formadas subcientemente y en el mismo instante, basadas en experiencias previas o posiblemente en la intuición.

VII—LOCALIZACION ESPACIAL BAJO CONDICIONES NO NATURALES DE ESTEREOVISION SIN LENTES

Retornemos al examen estereoscópico de un par de fotografías sin usar lentes. Podemos descartar, por razones obvias, los Principios 3 y 4 del capítulo previo ya que son de muy pequeña o ninguna influencia, así que necesitamos considerar solamente el 1 y el 2. Ya sea que miremos con los ejes visuales cruzados o en la forma convencional, los ojos siempre tienen que acomodarse para la distancia entre los ojos y las fotografías (digamos 50 cm.). Los Principios 2a y 2b en este caso se apoyarán mutuamente. La convergencia, sin embargo, no estará de acuerdo con este estado de acomodación, porque tendremos que separar las fotografías por cierta distancia (*S*). Así los Principios 1 y 2 no estarán en perfecta armonía el uno con el otro.

Si damos a las fotografías una separación igual a la base visual y si las miramos en la forma convencional con los ejes visuales paralelos, entonces los músculos de convergencia ("recti interni") tratarán de convencernos que el estereomodelo está infinitamente alejado. Los músculos de acomodación, de acuerdo con el Principio 2b, sin embargo nos sugerirán, que el modelo está a 50 cm. de distancia y como resultado veremos el modelo entre el infinito y 50 cm. pero más cerca de los 50 cm. (digamos 3 metros) que del infinito, porque la influencia de los músculos de convergencia será más bien pequeña (vea la Fig. 13 en combinación con el texto en la sección anterior) y los otros principios (2a y 2b) dominarán por la proximidad de las figuras.

Algo similar sucederá si alejamos las fotografías un poco más y las examinamos con los ejes visuales divergentes. Como antes, tenemos que girar los ojos hasta una posición tal que las imágenes de las impresiones caigan en puntos retinales correspondientes¹⁵. Siempre tenemos que actuar de esta manera, ya sea que los ejes visuales estén cruzados, paralelos o divergentes, porque ésta es una condición básica para el estereoscopismo, es decir, para la visión "plástica".

(15) Al menos para cierto número de puntos que pertenecen al plano de referencia. Otros puntos delante o detrás del plano de referencia serán evaluados respecto a su profundidad estereoscópica por la actividad mental de Panum.

El modelo plástico observado aparecerá algo más lejos (digamos 3.5 m.) bajo el examen divergente, pero para comprender el por qué tenemos que recordar que convergencia y acomodación están acopladas, aun cuando en forma suelta (ver el experimento del estereoscopio y la moneda). Esto significa que la acomodación para la distancia de las fotografías (50 cm.) no puede ser mantenida para una convergencia que corresponda a objetos en el infinito, y así, quieranlo o no, los ojos se acomodarán para una distancia digamos de 60 cm. Tanto más se alejará la acomodación de la distancia de las fotografías (50 cm.) cuanto más divergentes sean los ejes visuales: por la acopladura de los fenómenos los ojos estarán forzados a acomodarse, digamos, para 70 cm. En vez de ver ahora el estereomodelo a tres metros tendremos la impresión de que está por ejemplo a tres y medio metros.

Este vínculo entre acomodación y convergencia puede ser responsable del hecho de que la última todavía tenga una fuerte influencia en la localización espacial de impresiones visuales aun cuando la sensación muscular para la fijación de objetos lejanos sea muy pequeña.

También podemos comprender que con el incremento del ángulo de divergencia, la acomodación es arrastrada tan lejos de su valor original (50 cm.), que las fotografías y por consecuencia el modelo estereoscópico ya no pueden verse con nitidez.

Las relaciones entre acomodación y convergencia son, sin embargo, mutuas. La voluntad de ver el modelo con nitidez, es decir con acomodación apropiada, por otra parte, pondrá un límite a la magnitud posible de divergencia. Cuando tratamos de traspasar este límite, separando aún más las fotografías, las imágenes de las fotos en ambos ojos ya no pueden caer en puntos retinales correspondientes. Así el estereoscopismo se pierde si separamos demasiado las copias.

Sin embargo un mayor grado de divergencia puede ser alcanzado si reducimos la desarmonía entre convergencia y acomodación, esto es, si alejamos más las fotografías de los ojos.

VIII—LOCALIZACION ESPACIAL POR VISION NO NATURAL CON LENTES

Cuando examinamos fotografías estereoscópicas con un estereoscopio, ellas estarán más o menos en el plano focal de las lentes. Rayos paralelos entrarán entonces en nuestros ojos y los músculos de acomodación permanecerán en estado de descanso, es decir, acomodados para el infinito. De esta manera, el Principio 2a intenta hacernos creer que el estereomodelo está infinitamente alejado. Sin embargo, esta influencia es muy pequeña como podemos comprenderlo por lo que fue dicho previamente acerca de la acomodación.

A causa de las relaciones entre acomodación y convergencia (Sección III), es altamente conve-

niente mantener los ejes de los ojos paralelos, esto es, mantener la armonía entre los principios 1 y 2a. Por consiguiente, preferimos dar a las fotografías una separación igual a la base visual¹⁶.

El principio 2b, sin embargo, localizará, por sí solo, el estereomodelo en el plano focal de las lentes. Tendremos entonces una competencia entre 2b por un lado y 1 y 2a por el otro. El Principio 2b, sin embargo, reacciona muy fuertemente, porque las copias están muy cerca, pero 1 y 2a reaccionan más bien débilmente. El resultado es que vemos el modelo entre el infinito y el plano focal de las lentes del estereoscopio, pero muy cerca a este plano.

Aquí tenemos la explicación de la visión estereoscópica con los ejes de los ojos paralelos para el caso de que las lentes sean usadas, mientras que la situación similar sin lentes fue ya explicada en la sección previa. Hasta ahora fue incomprensible cómo tal visión estereoscópica pudo tener lugar. El famoso postulado de Euclides sobre líneas paralelas que por otra parte ya ha causado tantas noches de desvelo a muchos científicos (Historia de la geometría no euclidiana!), fue también aquí la piedra de tropiezo. La salida de este problema no está, como lo hemos visto, en el campo de la geometría, ni tampoco en el de la óptica geométrica, sino en el reino de la fisiología y la psicología.

Sin embargo, no es indispensable mantener los ejes de los ojos paralelos. Si acercamos las fotografías un poco más, la armonía entre el principio 1 y 2b será alterada y el conflicto de las tendencias 1 y 2b disminuirá. Así queda menos resistencia contra 2b y como consecuencia el modelo se aproximará al plano focal de las lentes. Al apartar las fotografías, la discordancia entre 1 y 2b aumenta. El modelo entonces será trasladado más lejos del plano focal.

IX—LA ADAPTACION DE LA TEORIA DE PROYECCION A LA VISION NO NATURAL.

A. Teoría de proyección a la tesis de Wheatstone para la visión natural.

En las secciones anteriores indicamos cómo la visión estereoscópica puede ser explicada fisiológicamente. Ahora se preguntará al lector en qué extensión podrá contribuir todo esto al conocimiento de la relación entre el estereomodelo y la fotografía original. Por el momento el autor puede solamente dar una indicación de la manera como se puede aproximar cuantitativamente esta relación.

Los fenómenos fisiológicos envueltos en la estereovisión parecen representar un material más bien veleidoso para un tratamiento cuantitativo, pero de alguna manera debemos tratar de darles un fun-

damento geométrico. El mejor punto de partida, para la introducción de la geometría, parece ser todavía la tesis de Wheatstone. Por consiguiente, reconsideraremos este principio a la luz de las ideas desarrolladas.

Todas nuestras consideraciones nos llevan a la conclusión de que la tesis de Wheatstone está radicada profundamente en principios anatómicos y fisiológicos. Ciertamente es muy importante para la visión binocular natural.

La disposición anatómica de nuestros ojos en relación con la agudeza máxima en la fóvea (Fig. 3) y el concepto de puntos correspondientes de la retina (Fig. 11) indican *que es prácticamente imperativo dirigir los ejes visuales*, es decir fijarlos, *al objeto de nuestro interés*.

La tesis, de que el objeto se ve donde se intersectan los ejes visuales no es más que una formulación inversa de lo que acabamos de asegurar; ella se basa en nuestros hábitos naturales de visión y refleja la convicción de que las impresiones visuales corresponden a la realidad.

Porque no hay razones especiales para suponer que el concepto que nos hacemos del espacio que nos rodea, sea en cualquier aspecto diferente de la realidad, al menos en principio, esto es, con la exclusión de defectos orgánicos y ciertas ilusiones ópticas. Por consiguiente *presuponemos axiomáticamente que nuestras impresiones del espacio, si son obtenidas bajo condiciones normales y naturales de visión binocular, corresponden a la realidad* y que la tesis de Wheatstone es correcta bajo esas condiciones aun cuando para un área limitada y en un sentido restringido.

El *principio limitado de Wheatstone* puede formularse como sigue: un objeto muy pequeño, o punto material, sobre el cual fijamos la mirada con atención se ve en el sitio donde los ejes visuales se intersectan.

El principio se puede extender a todos los puntos materiales, *alrededor del punto de concentración visual, que se encuentren en el horóptero*. La teoría de Wheatstone permite reconstruir geoméricamente lo observado porque basta reprojectar las imágenes retinales hacia afuera en líneas rectas a través de los puntos nodales de los ojos. En la intersección de las dos líneas, cada cual proyectada desde un ojo diferente, se supone que están los puntos materiales. Este *principio de Wheatstone entendido* es el equivalente de la llamada *teoría de proyección*,¹⁷ que pretende lo mismo.

Estrictamente hablando, la tesis de Wheatstone y la teoría de proyección no son correctas, porque ellas no pueden explicar las imágenes dobles. Sin embargo, parecen aceptables para la zona inmediatamente contigua al horóptero, es decir, para la región donde percibimos profundidad estereoscópica por la actividad de Panum.

(17) Von Tschermak - S., p. 150.

(16) Esto se aplica a estereoscopios de lentes sin espejos. Para un estereoscopio de espejo la separación total será la suma del efecto causado por la reflexión de los espejos y la separación arriba mencionada como si los espejos no estuvieran presentes. Vea también el texto de la Fig. 20.

Podemos extender aún más el principio: nuestro *concepto intelectual del espacio* es algo diferente de la *impresión observada del espacio* indicada en las figuras 11f y 15. No solamente que las imágenes dobles son psicológicamente suprimidas sino que, además, movemos el punto de fijación visual sobre el paisaje y nos formamos así un concepto del espacio, uniendo mentalmente en un conjunto tridimensional una tras otra todas las zonas horóptéricas que hemos apreciado estereoscópicamente por la actividad de Panum. Este espacio subjetivo y mentalmente reconstruido lo podemos suponer como equivalente al espacio obtenido por la *teoría de proyección*, al menos cuando vemos con nuestros ojos de manera natural, con los principios 1 y 4 en perfecta armonía.

B. Teoría de proyección para la visión no natural.

Como la *teoría de proyección* o la *tesis de Wheatstone extendida* es de tal importancia para la visión binocular natural y es tan apropiada para la representación geométrica, es sugestivo aplicar la misma, tal vez algo modificada, para las condiciones no naturales de visión binocular. Cuando intentamos efectuar la mencionada reconstrucción geométrica, inmediatamente caemos en cuenta del embarazoso hecho de que nos falta un punto de fijación visual para un gran número de casos (investigación de aerofotos con los ejes visuales paralelos o divergentes) y así no serán encontradas ningunas intersecciones mediante dichas construcciones de la teoría de la proyección. Sin embargo, vemos el estereomodelo a una determinada distancia. Nuestro primer paso será por consiguiente introducir el punto de *fijación virtual*,¹⁸ y es obvio escoger este punto en el lugar donde vemos el estereomodelo. Podemos aplicar ahora las construcciones geométricas bien definidas de la *teoría de proyección* si estimamos a qué distancia hemos proyectado el estereomodelo. Así gozamos además de las siguientes ventajas:

1. Se evita la determinación de influencias mutuas entre factores fisiológicos poco conocidos, lo cual no puede lograrse sin un laboratorio bien equipado.
2. Podemos basar las relaciones entre el estereomodelo y el original fotografiado en datos experimentales. Esto es especialmente importante porque es de esperar que los factores fisiológicos mencionados arriba, serán algo diferentes para cada persona y variarán con la edad o con el estado físico del foto-intérprete (fatiga, etc).

La estimación de la distancia del estereomodelo, muy simple en principio, puede causar sin embargo, algunas dificultades especialmente al comienzo. Un poco de práctica ayudará a superarlas.

El punto de fijación virtual debe ser utilizado no solamente para aquellos casos que no dan inter-

(18) En recuerdo de la *imagen virtual* en la óptica de las lentes.

secciones geométricas de rayos, sino también para todas las situaciones de visión binocular no natural¹⁹. De manera que podremos concluir:

a) Bajo condiciones naturales de visión binocular podemos aplicar la teoría de la proyección si tenemos presente sus restricciones.

b) *Bajo condiciones estereoscópicas no naturales debemos siempre aplicar la teoría de proyección en combinación con el punto virtual de fijación.*

Por consiguiente nuestro primer paso será estimar la distancia de los ojos al punto de fijación virtual. Esto lo ha hecho el autor en todos los casos posibles de visión binocular de un par de fotografías observadas sin lentes a una distancia (D) de 26 cm. (vea las figura 16 con las notas explicativas). Podemos deducir del gráfico que solamente en un caso la distancia del punto virtual de fijación (Fv) puede ser igual a la distancia de los ojos a las fotografías, y este es el caso en que miremos un anaglifo. Para todos los otros casos debemos encontrar valores para Fv que sean diferentes a la distancia D donde están las copias. Estas diferencias

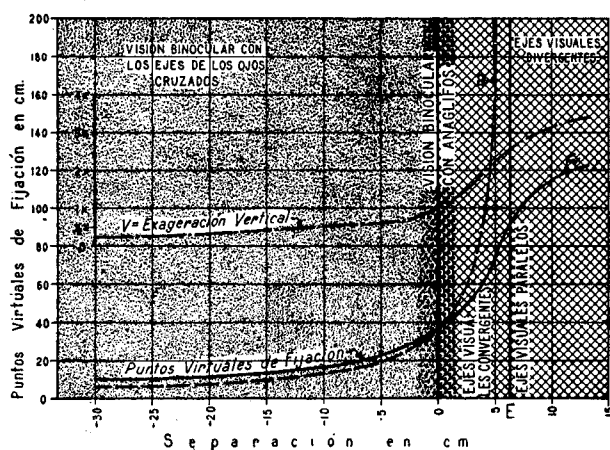


Fig. 16.—La distancia de los puntos de fijación virtual como una función de la separación entre las fotografías.

Las fotografías, colocadas a 36 cm. de los ojos, son observadas sin lentes. La separación en este caso puede variar desde 30 cm. negativa hasta 12 cm. positiva. El modelo estereoscópico se pone menos nítido cuando la separación alcanza grandes valores positivos o negativos y finalmente se disuelve.

La curva de los puntos virtuales de fijación no se puede determinar para la zona de puntos gruesos (visión anaglífica), ya que las fotografías se cubren mutuamente. La curva debe, sin embargo, intersectar la línea cero a 36 cm. Muchas curvas semejantes pueden ser construidas para diferentes distancias entre fotos y ojos.

La exageración vertical fue determinada para cada punto de fijación virtual mediante la ecuación 9) e indicada separadamente en el gráfico. La curva "a" indica a qué distancia están las intersecciones geométricas de los ejes visuales, donde se encontraría el estereomodelo según la tesis de Wheatstone. Esta curva se acerca asintóticamente a una línea vertical, dibujada en el gráfico a la distancia interpupilar (E) de la línea cero.

Las cinco zonas de esta figura ("ejes cruzados", "anaglifo", "ejes convergentes", "ejes paralelos" y "ejes divergentes") corresponden, en el mismo orden, a los cinco casos de la figura 19.

(19) La visión binocular es aquí llamada *natural* cuando todos los principios 1-4 están en completa armonía. No *natural*, por ejemplo, cuando acomodamos para 30 cm. y convergimos para 5 m.

son más bien pequeñas cuando miramos a las fotografías con los ejes de los ojos cruzados, pero puede ser considerable cuando estos ejes están casi paralelos.

Una vez que las distancias de los puntos de fijación virtual son determinados podemos reconstruir el estereomodelo observado con la *teoría de proyección*.

En la figura 17 se presenta como ejemplo la construcción de un estereomodelo observado con los ojos visuales ligeramente convergentes. PH es la posición de las fotografías examinadas con los ojos desnudos. Los rayos ópticos que vienen de las fotografías a los ojos (OI y OD) están dibujados como líneas gruesas. La intersección de sus prolongaciones hacia abajo, dibujadas como líneas interrumpidas, definen el modelo geométrico imaginario. Las continuaciones (Vg) de los ejes visuales (V) se intersectan en Fg, donde forman un ángulo γ ; Fg es el punto en donde está fijada la mirada.

Para la reconstrucción geométrica del estereomodelo se consideran las fotos desplazadas a la posición PH' de tal manera que los ejes visuales rotados (V') se intersectan a la distancia Fv , que es la aproximada distancia virtual de fijación. Las líneas delgadas y sólidas indican la reconstrucción del modelo estereoscópico observado.

Las líneas de puntos que divergen del ojo ciclópeo y mental Em, representan las rutas imaginarias a lo largo de las cuales se supone que se efectúa la proyección mental de la estereo-imagen desde el cerebro hacia afuera; los ejes visuales (V) coinciden ahora con la línea de visión V'' (compare con la Fig. 11a y 11f). D es la distancia entre los ojos y las fotografías.

C. El efecto de los lentes

Nos falta analizar la situación al utilizar lentes de aumento como los que tienen, por ejemplo, los estereoscopios. Antes de todo es necesario investigar en general todo el efecto óptico causado por un lente. Observando un objeto con un lente o una lupa se supone por lo general que el objeto está colocado en el plano focal del lente utilizado. Esto por lo menos es el modo más cómodo de observación, porque así entrarán rayos ópticos paralelos en el ojo, el cual no necesita acomodar y descansa. En estas condiciones se supone que el aumento es $\frac{25}{f}$ cuando f es la distancia focal (en cm.) del lente en cuestión, o también $\frac{Ld}{4}$ cuando Ld es el poder refringente del lente en dioptrías ($Ld = \frac{100}{f}$). Este sería el *aumento convencional*.

Si tenemos el lente muy cerca del ojo, el objeto estará separado del ojo por una distancia aproximadamente igual a la distancia focal (f) del lente. Se puede, además, observar que un objeto parece mucho más grande si lo tenemos muy cerca al ojo,

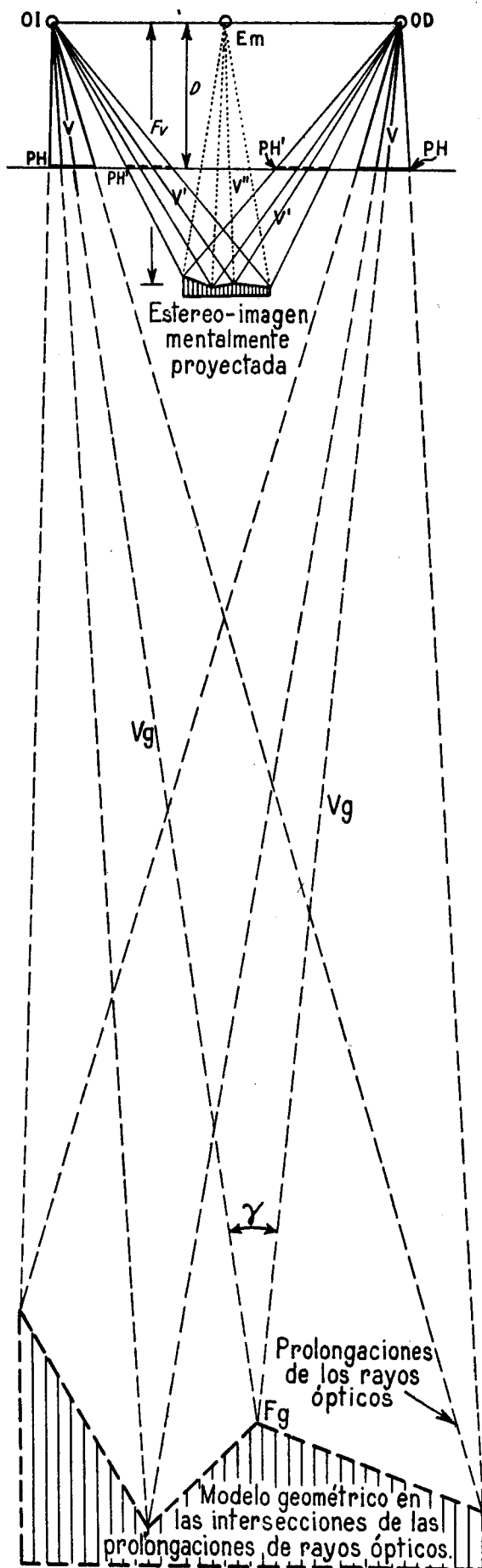


Fig. 17.—Ejemplo de la construcción geométrica de un estereomodelo.

digamos a 4 centímetros, sólo que sin lente no lo veremos con nitidez, porque el lente ocular no se puede acomodar para una distancia tan extremadamente corta y proyectará una imagen borrosa a la retina. Es obvio que en este caso del aumento convencional, el lente sirve sólo para ayudar al ojo en la acomodación a fin de que podamos tener el objeto muy cerca del ojo y verlo grande porque de esta manera lo observamos dentro de un ángulo bastante más amplio.

Sin embargo, es dudoso que esto fuera la única función del lente. Prosigamos a investigar si hay otros efectos que puede producir. Utilicemos una cámara lúcida, llamada "sketchmaster" por los norteamericanos, aparato que permite ver dos escalas (Fig. 18a: S1 y S2) a la vez por medio de un espejito semi-transparente (Es) puesto delante del ojo (O), espejito que es suficientemente transparente para ver S2 pero también refleja el S1. En un trayecto, entre O y S2, se puede poner un lente (L) y estudiar su efecto, comparando las dos es-

calas S1 y S2. Para acercarnos a las condiciones en que usamos los lentes en los estereoscopios, podemos colocar S2 a la distancia focal f del lente L. Se empleó el "reproductor gráfico para vistas aéreas" (Luftbildumzeichner) fabricado por la compañía alemana Zeiss Aerotopograph, aparato que permite variar tanto la distancia OS1 como la OS2 e interpusimos varios lentes en el trayecto OS2. Los resultados están reunidos en la siguiente tabla:

TABLA I

Poder del lente en dioptrías	Distancia focal en cm. (f)	Ampliación	Distancia entre lente y ojo en % de f
3	33,3	1,13×	16,5%
4	25,0	1,18×	22,0%
5	20,0	1,25×	27,5%
6	16,7	1,30×	33,0%
7	14,3	1,33×	38,0%
8	12,5	1,37×	44,0%
9	11,1	1,38×	50,0%
10	10,0	1,39×	55,0%

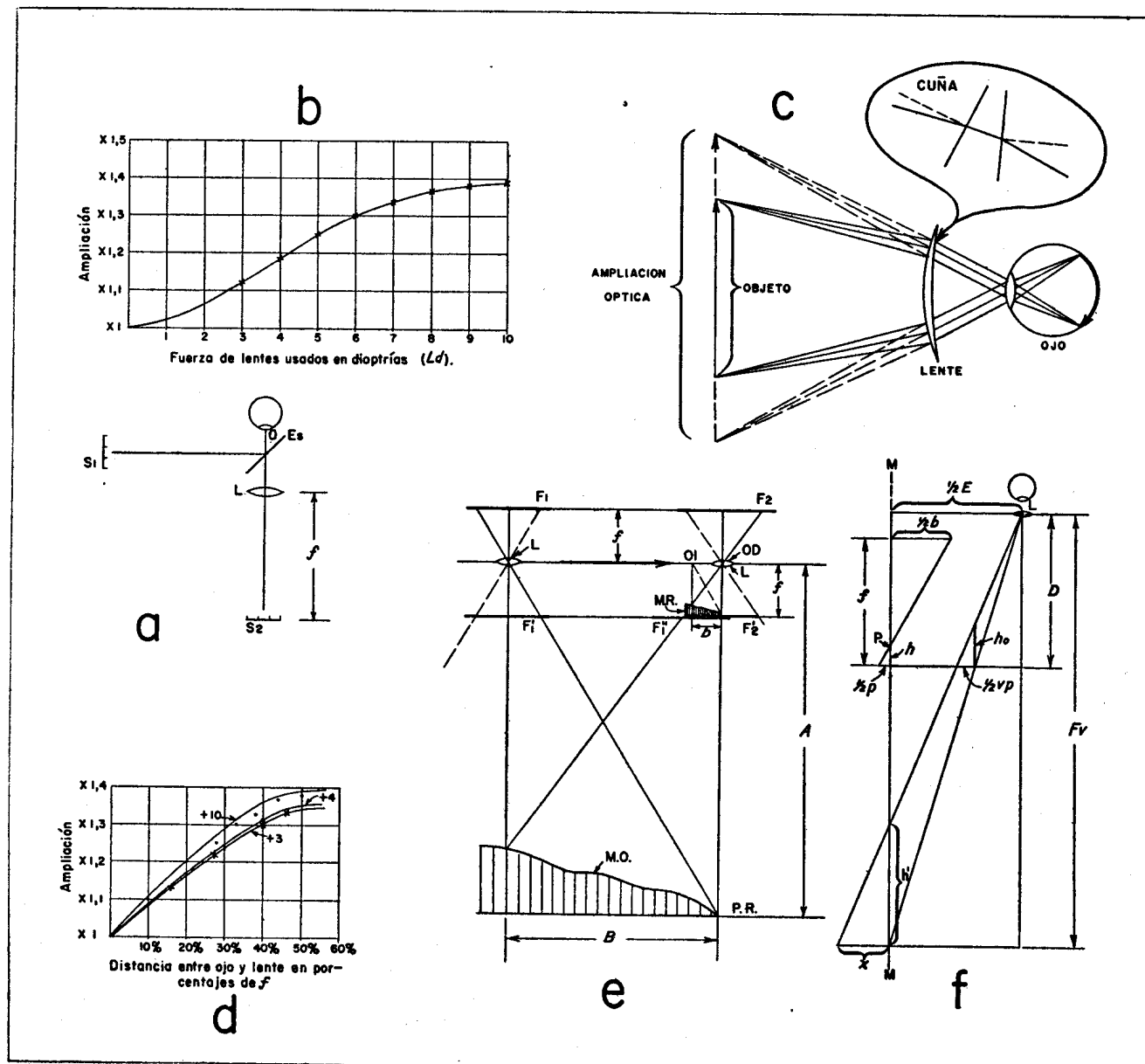


Fig. 18

Además de la ampliación convencional existe entonces otra que podemos llamar *ampliación óptica* y la ampliación total es aparentemente el producto de ambas.

Haciendo un gráfico de los resultados de la Tabla I (Fig. 18b) podemos observar que la curva es mucho menos inclinada hacia el lado de los lentes fuertes. La curva pasará por la esquina del gráfico porque la ampliación debe ser $1 \times$ por un lente con $Ld = 0$ (es decir cuando no se usa ningún lente. Para lentes negativos que dan amplia-

ciones menos de $1 \times$, continuaría la curva en el cuadrante izquierdo inferior).

Parece que la ampliación óptica es producida por la refracción del lente como lo muestra la Fig. 18c. Quitemos el lente de su ranura en el aparato y tengámoslo más cerca a S2 sin cambiar las distancias OS1 y OS2. Podemos observar que la ampliación óptica aumenta a medida que alejemos del ojo el lente L. Expresando la distancia OL en porcentajes de la distancia focal f del lente podemos resumir los datos obtenidos con lentes de 3 y 4 dioptrías de la manera siguiente:

TABLA II

lente 3	OL en % de f	16.5 %	27.0 %	39.6 %	46.2 %
	ampliación	1.12 x	1.23 x	1.30 x	1.33 x
lente 4	OL en % de f	22.0 %	39.7 %		
	ampliación	1.18 x	1.315 x		

Alejando el lente del ojo utilizamos las partes más al margen del lente donde la refracción es aparentemente más grande y esto causa una mayor ampliación óptica.

Por las características en la construcción del reproductor gráfico, no podemos acercar el ojo como quisiéramos, de tal modo que los valores de la ampliación óptica serán, en realidad, más pequeños de lo que indica la Tabla I. Hemos colocado los datos de las observaciones (Tabla I y II) en un gráfico cuya abscisa expresa la distancia OL en porcentajes de f (fig. 18d). Nos consta que las curvas que pertenecen a lentes de diferentes potencias no se alejan mucho las unas de las otras. La tendencia de la curva del lente 3, definida por las cruces, sugiere que la curva pasará por el origen del gráfico. Esto sería una consecuencia lógica, porque indicaría que la ampliación óptica sería $1 \times$ (es decir, que no hay ampliación) para el caso teórico de no haber distancia entre lente y ojo, condición que muchas veces se presupone en la teoría de lentes. *Solamente por no poderse realizar esta condición, la ampliación convencional está siempre acompañada de alguna ampliación óptica.*

Extrapolando las observaciones podemos deducir que un lente de 10 dioptrías, común en varios estereoscopios de bolsillo, usado a un centímetro del ojo, o a 10% de su distancia focal, no produce ampliación óptica notablemente más grande de $1.1 \times$ (ver fig. 18d)¹⁹. Para lentes menos potentes, usados a la misma distancia del ojo, se podría en la práctica despreciar este efecto óptico y considerar el lente sólo como una ayuda en la acomodación.

D. La distorsión del estereomodelo de dos vistas aéreas. Su cálculo.

Determinado el efecto producido por los lentes, proseguimos a buscar la relación geométrica entre

un terreno fotografiado y el modelo estereoscópico correspondiente, observado mediante dos aerovistas verticales.

Lo más conveniente es establecer las diferencias entre ese estereo-modelo y un *modelo reducido*, en el cual se convergen las relaciones angulares del original.

En la fig. 18e representa A la altura (de las lentes L) de una cámara aérea sobre un plano de referencia ($P. R.$) en el terreno o modelo original ($M. O.$). F_1 y F_2 son las placas fotográficas en dos posiciones consecutivas dentro de la línea de vuelo (flecha), estando las placas a la distancia focal f de los lentes L . La escala de las fotos es entonces $\frac{f}{A}$ (basada en el plano de referencia). F'_1 y F'_2 son las mismas placas fotográficas invertidas, a una distancia f debajo de la línea de vuelo, para indicar más directamente la correspondencia con $M. O.$, ya que esta inversión no introduce ningún cambio en las relaciones geométricas. F''_1 es la fotografía invertida F'_1 trasladada paralelamente cerca a F'_2 de tal manera que la distancia entre los centros de las fotos F''_1 y F'_2 sea b . La intersección de los rayos trazados de OI a detalles de la foto F''_1 por una parte y los trazados de OD a los mismos detalles en la foto F'_2 por otra parte, forman un modelo reducido ($M. R.$) del original $M. O.$. Si escogemos la distancia b tal que esté en la misma proporción con B como f está con A (es decir cuando $\frac{b}{B} = \frac{f}{A}$), el modelo $M. R.$ será entonces una exacta reproducción de $M. O.$ en escala $\frac{f}{A}$.

No cabe duda que veríamos un modelo estereoscópico igual a $M. R.$ si pudiéramos tener los ojos en la posición de OI y OD con relación a las fotos. Esto, en general, no es practicable, primero, porque la distancia entre los ojos es fija (en promedio 6.25 cm.) y sólo excepcionalmente sería igual a b , y segundo, no se podría acomodar para una distan-

(19) Este valor puede variar algo para diferentes tipos de lentes, lo mismo que los datos de las Tablas I y II.

cia tan corta como f . Además, hay el inconveniente de que una foto cubriría la mayor parte de la otra.

La distorsión del estereomodelo, sea que esté visto con los ojos desnudos, sea con un estereoscopio, es entonces introducida por el hecho de no poder tener los ojos con una separación apropiada en el punto focal de las fotos.

Deducimos la distorsión del estereomodelo con ayuda de la figura 18f en la cual representan:

b : base de las aerovistas en el modelo reducido.

h : altura de un punto P en el modelo reducido.

p : paralaje del mismo punto P medido en las fotos.

f : distancia focal de las fotografías.

D : distancia entre ojos y fotografías.

E : separación individual de los ojos, base visual.

v : ampliación óptica del lente utilizado.

F_v : distancia virtual de fijación.

h' : altura del punto P en el estereomodelo.

h_o, w, x : símbolos de líneas en fases intermedias de las ecuaciones.

En las ecuaciones:

S_h : escala horizontal del estereomodelo.

S_v : escala vertical del estereomodelo.

E_v : exageración vertical del estereomodelo.

Sólo la mitad a la derecha de la línea mediana $M-M$ está dibujada.

Con triángulos semejantes se deduce:

$$h \quad \frac{h}{f} = \frac{\frac{1}{2}p}{\frac{1}{2}b + \frac{1}{2}p} \quad h = \frac{pf}{b+p}$$

$$x \quad \frac{x}{\frac{1}{2}vp} = \frac{F_v}{D} \quad x = \frac{\frac{1}{2}vpF_v}{D}$$

$$w \quad \frac{x}{\frac{1}{2}E} = \frac{D}{F_v} \quad w = \frac{\frac{1}{2}ED}{F_v}$$

$$h_o \quad \frac{h_o}{D} = \frac{\frac{1}{2}vp}{\frac{1}{2}vp + w}$$

Introduciendo la ecuación encontrada para w :

$$h_o = \frac{vpDF_v}{vpF_v + ED} \quad h' = \frac{h'}{h_o} = \frac{x}{\frac{1}{2}vp}$$

Al introducir las ecuaciones encontradas para h_o, x :

$$h' = \frac{vpF_v^2}{vpF_v + ED}$$

$$S_v = \frac{h'}{h} = \frac{vpF_v^2 (b+p)}{(vpF_v + ED) f} \quad \dots\dots\dots 5)$$

$$S_h = \frac{x}{\frac{1}{2}p} = \frac{F_v}{D} \quad \dots\dots\dots 6)$$

$$E_v = \frac{S_v}{S_h} = \frac{DF_v (b+p)}{(vpF_v + ED) f} \quad \dots\dots\dots 7)$$

Para valores muy pequeños de p las ecuaciones 5) y 7) se transforman en:

$$S_v = \frac{vF_v^2 b}{EDf} \quad \dots\dots\dots 8)$$

$$E_v = \frac{F_v b}{Ef} \quad \dots\dots\dots 9)$$

A primera vista puede extrañar que la ecuación 9) para E_v no contenga los factores D , y la separación S de las fotografías, y que éstos falten además en las otras ecuaciones. Al consultar el lector el gráfico de la figura 16 notará que aquellos factores ya están implícitamente incluidos en el valor de F_v . La ampliación óptica (v) no influye en la exageración vertical, cuando los paralajes p son pequeños, es decir cuando no nos alejamos mucho del plano de referencia, porque la ampliación óptica afecta de igual manera la escala horizontal como la vertical.

Demostremos la aplicación de las ecuaciones con un ejemplo práctico. Cuando examinamos un par de aerovista con un estereoscopio y de manera corriente, o sea con los ejes visuales paralelos y acomodando el ojo para el infinito, la distancia de fijación virtual debe ser algo más grande que la distancia focal de los lentes, porque la fuerza de los principios 1 y 2a es débil y la de 2b bastante fuerte. Estimando que el estereomodelo, observado con un estereoscopio de espejos Zeiss con lentes de 3,75 dioptrías o $f = 26,6$ cm. se encuentra a una distancia de 30 cm. de los ojos, y suponiendo que se están utilizando las fotografías grandes de 23 cm. de lado, se puede tomar un valor medio de 10 cm. como base (b) de las fotos. Como la distancia focal que corresponde a estas aerovistas es de 15 cm. encontramos mediante la ecuación 9) una exageración vertical de 3 veces aproximadamente. Una pendiente o plano inclinado del estereomodelo, estimado en 60° (la tangente es 1,73) corresponde entonces en el modelo original a un ángulo de 30° , cuya tangente es una tercera parte $\left(0,577 = \frac{1,73}{3}\right)$.

La ecuación 7) sugiere que la exageración vertical no es constante en el estereomodelo que varía cuanto más nos alejamos del plano de referencia. Esto no es sorprendente, porque también la fotografía aérea, tomada sobre terreno montañoso, no es de escala constante. En este estudio no podemos entrar en estos detalles, ni en los efectos causados por distorsiones de perspectiva o en la influencia del movimiento del estereoscopio encima de las fotos.

Para conveniencia del fotointérprete todos los casos posibles de visión estereoscópica, con o sin lentes, están representados sistemáticamente en las figuras 19 y 20.

Fig. 19.—*Visión estereoscópica no natural sin lentes*. Explicación de las figuras: las figuras presentan todas las posibilidades (casos I-V) de examen estereoscópico de fotografías sin lentes, comenzando con una fuerte visión convergente en el lado izquierdo (separación negativa) hasta una visión fuertemente divergente a la derecha (separación mayor que la base visual).

El segundo caso (II) no puede en general ser realizado sin el uso de espejos a menos que se utilicen anaglíficos impresos.

Para cada caso esencialmente diferente, se dibujaron dos figuras. La de la izquierda representa esquemáticamente el modelo geométrico de los rayos ópticos, la figura derecha muestra la reconstrucción del estereomodelo como realmente es observado bajo la influencia de los principios fisiológicos activos. Esta reconstrucción se ejecuta de acuerdo con la figura 17. La exageración vertical está indicada para cada caso con referencia a la del modelo anaglífico.

(V. $Ex = Ix$). Podemos observar que el tamaño de los modelos aumenta de izquierda a derecha. La exageración vertical también aumenta en la misma dirección. En el caso I el modelo observado es verticalmente comprimido. (Exageración vertical menor que 1).

Los principios que determinan la distancia Fv , a la cual se observa el modelo, están representados por grandes círculos si la influencia es fuerte, por círculos más pequeños si la influencia es menor. El lector recuerde que los principios 1 y 2a están acoplados en forma tal que el uno puede ser arrastrado fuera de "equilibrio" o fuera de la "tendencia normal" por el otro cuando la desarmonía entre los dos es grande. En casos de conflicto extremo entre 1 y 2a (hacia la izquierda y hacia la derecha de la figura) se pierde el estereoscopismo. Si los principios 1 y 2a están en armonía (tienen las mismas tendencias) tenemos el caso de la visión más confortable, que es el caso II: "visión anaglífica".

Los "diagramas de fuerzas" se leen de la siguiente manera, por ejemplo caso I: los ejes de los ojos se intersectan a la distancia Fg . Así el músculo de acomodación tratará de sugerir que el estereomodelo está en Fg , si no fuera porque 1 está acoplado con el músculo de acomodación. La fuerte desarmonía entre 1 y 2a es la causa para que el modelo parezca ligeramente más alejado que la distancia Fg . El principio 2a por sí mismo, sin ser acoplado a 1, llevaría el modelo a D . Ambos principios en conjunto localizarán el modelo entre Fg y D , pero más cerca a Fg porque el principio 1 es más fuerte que el 2a. El lector puede analizar los otros casos a base de diagramas. (Vea también la Sección IX).

El principio 2b está prácticamente siempre en armonía con 2a. No necesitamos mencionarlo separadamente y se puede considerar incluido en el 2a.

Fig. 20.—(Primero lea las explicaciones de la fig. 19).

Los dibujos muestran todas las posibilidades de la visión estereoscópica *con lentes*, comenzando de nuevo con visión fuertemente convergente a la izquierda (la separación es negativa) y terminando con visión fuertemente divergente a la derecha (separación mayor que la base visual). Los casos de estereovisión fuertemente convergente (I, $s < 0$) y de la anaglífica (II, $s = 0$), sólo son posibles con estereoscopios de espejos, ya que bajo un estereoscopio de lentes sin espejos las fotografías estén aproximadamente en el plano focal de las lentes. De esta manera de cada punto material de las fotos se transmiten haces de rayos divergentes que son transformados por las lentes del estereoscopio en haces de rayos paralelos (vea el gráfico en el extremo izquierdo). Estos rayos paralelos entran a los ojos, que se acomodan para el infinito. Por consiguiente el principio 2a tiene una influencia más bien pequeña. Tiene una importancia secundaria por estar acoplado al principio 1. La estereoscopia se pierde nuevamente en los casos de extrema desarmonía entre los principios 1 y 2a, es decir, hacia la izquierda y derecha de la serie de figuras.

El principio 2b es siempre importante, a menudo dominante.

La construcción del estereomodelo observado es esencialmente igual a la que se ha explicado en la figura 17.

Las escalas y la exageración vertical están determinadas e indicadas por los dibujos de la misma manera como en la figura 19. Vemos nuevamente que el tamaño de los modelos y la exageración vertical aumentan de izquierda a derecha.

La manera más conveniente de estereovisión está representada en el caso IV, donde los principios 1 y 2a están en perfecta armonía.

El caso II tiene mucha semejanza con la visión anaglífica de la figura 19.

X. EXPLICACION DE VARIOS FENOMENOS CON BASE EN LA FISIOLOGIA

Puede ser conveniente al final de este artículo reconsiderar unos pocos fenómenos a la luz de las ideas desarrolladas.

Para este propósito regresemos a la figura 9, visión estereoscópica con los ejes visuales cruzados. Si introducimos dos punticos (como por ejemplo los puntos flotantes del estereómetro) en los rayos luminosos que unen los ojos con detalles similares en las fotografías, entonces esos dos punticos serán fundidos por la visión binocular, y la unidad estereoscópica formada por los puntos parecerá tocar el estereomodelo. Esto sucederá ya sea que pongamos los punticos encima o debajo del sitio donde veamos el modelo. Hay sin embargo, una sola posición donde únicamente un puntico daría la misma impresión y ésta es la intersección de los correspondientes rayos ópticos. En este lugar podríamos también sostener un lápiz y "tocar" con la punta cada detalle del estereomodelo observado.

Si medimos la distancia de la punta del lápiz a los ojos para cada detalle del modelo estereoscópico podríamos creer que hemos descrito y definido de esta manera el modelo como realmente lo observamos. Este, sin embargo, no es el caso.

Consideraciones fisiológicas nos han llevado a la conclusión de que la distancia entre los ojos y el modelo observado es algo más grande que la distancia entre éstos y el lápiz, así lo *que realmente hicimos con el lápiz es nada más que indicar el lugar de la intersección geométrica de los rayos ópticos!*

Sin embargo, hay ciertas relaciones entre el "modelo geométrico" y el estereomodelo mentalmente proyectado. Las leyes ópticas del primero, se reflejan en el segundo. Si varios puntos materiales están en una línea en el modelo óptico geométrico como el punto nodal del ojo, la punta del lápiz y ciertos detalles de las fotografías, entonces ellos se proyectarán en el mismo cono de la retina y esto dará la impresión de que también en el espacio mentalmente proyectado el lápiz está tocando el modelo. Existe cierta afinidad lineal entre los dos modelos pero esto no significa que ellos sean idénticos o que estén a la misma distancia de los ojos.

Esto puede aparecer algo extraño al principio, pero perderá todo el misterio, si nos acostumbramos a la idea de que nuestras impresiones visuales son ante todo experiencias fisiológicas y psicológicas provocadas, en este mismo orden, por los rayos ópticos. Podemos alcanzar rápidamente una mejor comprensión si repetimos la experiencia del puntico flotante, que puede ser solamente un experimento en nuestra imaginación, para el caso III de la figura 19. Las líneas que unen los puntos nodales de los ojos, los punticos y los detalles similares de las fotografías se intersectarán bastante

más abajo de las copias fotográficas, a la distancia *Fg*, que puede ser agrandada infinitamente si alejamos las fotografías un poco más (ver la figura 17). Las intersecciones de los rayos ópticos prolongados definen un modelo tridimensional muy grande situado a una gran distancia y es obvio que esto sea una cosa completamente diferente del estereomodelo observado!

Por consiguiente debemos ser muy cuidadosos en no atribuir, irreflexivamente, a nuestra imagen mental datos obtenidos por mediciones y se debe hacer siempre una clara distinción entre el espacio físico, el cual en efecto no observamos y el espacio mentalmente proyectado, que es el que realmente vemos. Estos dos pueden ser idénticos únicamente cuando los principios fisiológicos desde 1 hasta 4 están en perfecta armonía y aún en este caso es necesario que otras ilusiones ópticas queden excluidas.

En conexión con las particularidades arriba mencionadas podemos hacer las siguientes aseveraciones: *Medidas hechas con puntos flotantes nunca pueden definir las propiedades del estereomodelo observado, es decir, de la imagen mentalmente proyectada. Con esas marcas, nosotros sólo podemos investigar el modelo geométrico o el original fotografiado, según la manera en que ejecutamos las medidas.* Esta investigación del original fotografiado es llevada a cabo con los muchos instrumentos que son bien conocidos por el fotogrametrista. *La estereomagen psicológicamente proyectada puede ser estudiada solamente mediante estimación directa y subjetiva!*

Podemos con igual éxito aplicar la tesis fisiopsicológica de la visión estereoscópica al importante experimento de von Frijtag Drabbe con los fósforos (o lápices). Sostenga dos fósforos (I y D, derecho e izquierdo) a una distancia *D* (por ejemplo 30 cm.) en frente de los ojos (Fig. 21a). Veremos cuatro imágenes de los fósforos (Id, Ii, Dd y Di) si separamos nuestros ejes visuales en una forma tal como si fijáramos un punto (P) detrás de los fósforos (Fig. 21a, b).

Como los fósforos están dentro del círculo horopéutico, se formarán dobles imágenes, dos de cada fósforo. Cuando movemos los fósforos I y D uno hacia el otro, haciendo que guarden constantemente la misma distancia de 30 cm. entonces las imágenes centrales Ii y Dd pueden cubrirse y aún pueden ser fundidas en una imagen estereoscópica ID (Fig. 21c, d)²⁰.

(20) La imagen estereoscópica se obtiene de una manera inusual: Ella está generalmente constituida por dos imágenes de un solo objeto, visto desde dos posiciones diferentes; una muestra la parte de enfrente y algo del lado derecho y la otra exhibe la parte frontal y algo del lado izquierdo. Aquí, algo similar sucede con las imágenes de dos objetos diferentes (fósforos) que son, sin embargo, de idéntica forma. La imagen estereoscópica aparece más bien plana, porque se ve muy poco de los lados de los fósforos. Una imagen estereoscópica completa y redonda se ve si repetimos el experimento con los ejes visuales cruzados.

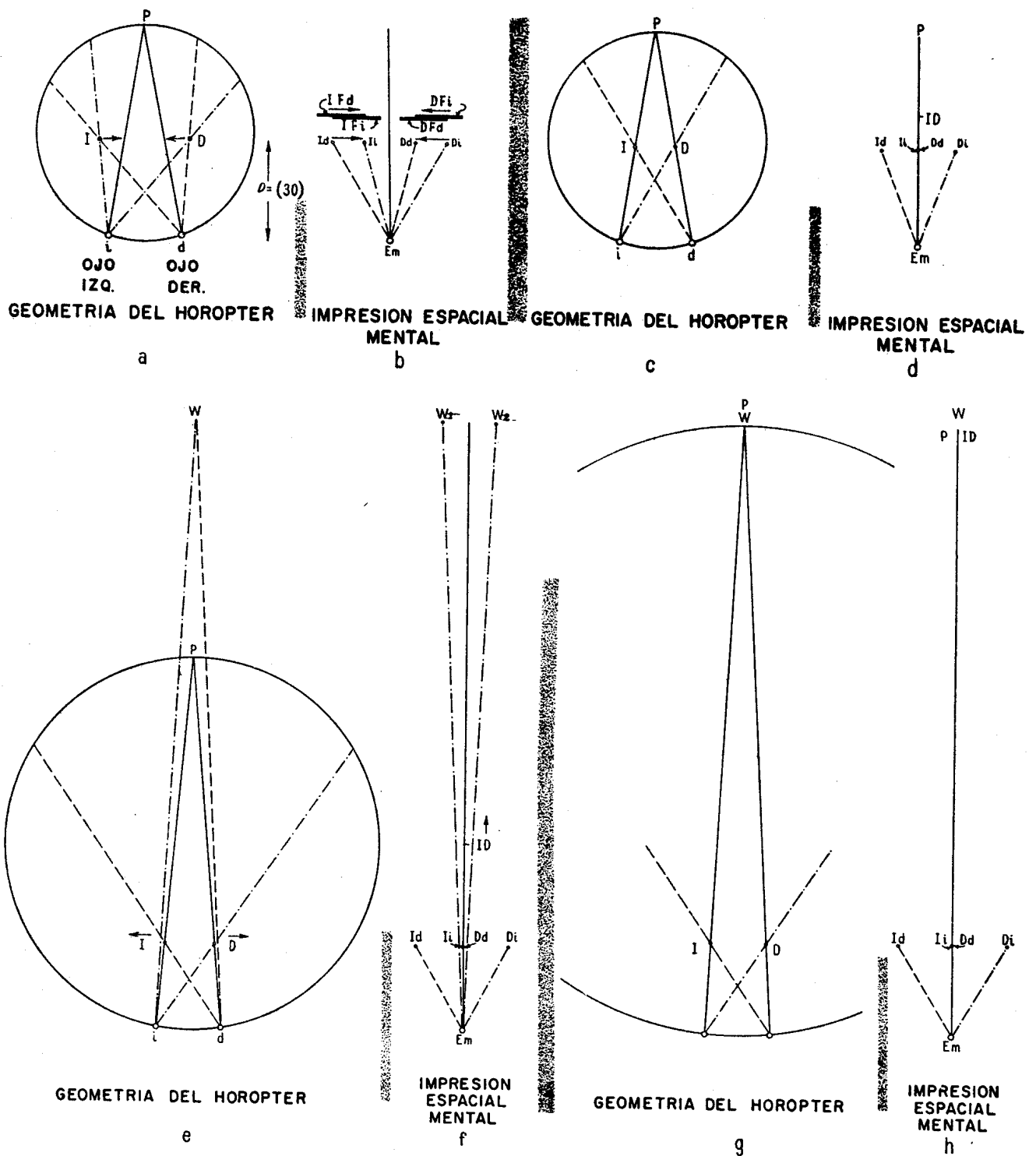


Fig. 21.—Análisis del experimento de los fósforos de von Frijtag Drabbe.

La imagen estereoscópica ID se localizará en alguna parte entre el punto de fijeza P y los fósforos I y D. Esto puede ser entendido cuando analizamos las tensiones fisiológicas. Por la sola actividad de los músculos de convergencia el estereomodelo estaría en P, en cambio los Principios 2a y 2b, lo localizarían a 30 cm. de distancia. El resultado es que ID tiene una posición intermedia, más cercana a 30 cm. que a P porque el principio 1 es más bien débil debido a la mayor distancia del punto P.

Debemos observar que los fósforos no se ven tan claramente como bajo las condiciones normales.

Esto es porque no acomodamos para la distancia verdadera de los fósforos (30 cm.). La acomodación está ligada a la convergencia y ambas tienen tendencias en pugna.

Queremos además señalar el hecho notable de que las imágenes Id y Di no están o casi no están bajo la influencia del principio 1, porque ellas permanecen, al menos aproximadamente, a la misma distancia de 30 cm. Por consiguiente parece que el principio 1 es efectivo solamente para las imágenes que caen en puntos de la retina correspondientes, y que las imágenes dispare (Id y Di) están dominadas completamente por los principios 2a y 2b.

El experimento del fósforo puede ser continuado en la forma siguiente: mirando atentamente a los fósforos con la firme intención de no perder el estereoscopismo de ID, moveremos los fósforos D e I aparte. Para no perder el estereoscopismo, debemos asegurar que las imágenes de los fósforos continúan formándose sobre puntos correspondientes de las retinas, es decir, tenemos que girar consecutivamente los ejes visuales, o en otras palabras, debemos colocar el punto de fijación más alejado de nuestros ojos (Fig. 21c). Como consecuencia, vemos la imagen ID alejándose. Objetos detrás de ID, por ejemplo un detalle en el panel de una ventana o sobre una pared (W), se ven como imágenes dobles no cruzadas (W1 y W2) porque ellos están fuera del horóptero. Estas imágenes W1 y W2 están observadas en la distancia real porque —como lo anotamos anteriormente— sólo los principios 2a y 2b tienen alguna influencia en estas imágenes dispares.

Mientras más alejemos los fósforos más se aproximará ID a W1-W2, mientras la separación de W1 y W2 disminuirá rápidamente. El principio 3 ahora se torna activo como una fuerza localizadora de la proyección mental ID en el espacio. La imagen estereoscópica ID como consecuencia se moverá rápidamente hacia W1-W2, hasta que por último, si continuamos separando los fósforos, llegará a W. El panel de la ventana W se ve ahora estereoscópicamente y podemos tocar cualquier detalle de él con la imagen estereoscópica ID, que puede ser movida con libertad en la zona de profundidad estereoscópica (zona de Panum) de W, separando los fósforos ligeramente o acercándolos un poquito. La situación ahora es tal que P e ID están todos en el mismo punto W (figura 21g, h), Id y Di a 30 cm. de distancia e I y D en los ejes visuales (Fig. 21g). Aquí la tesis de Wheatstone, que dice que la imagen estereoscópica obtenida por fusión de I y D se encuentra en el punto de fijación P, es completamente correcta. El experimento de los fósforos fue ideado por von Frijtag Drabbe, apoyado en ello por E. R. Goodale, principalmente como una prueba contra la tesis de Wheatstone y en los casos de la figura 21c-f realmente muestra que esta tesis es incorrecta. Analizaremos a continuación por qué no en el caso de la figura 21g-h.

No cabe duda que ID estaría en alguna parte entre P y los 30 cm. si los detalles de la ventana no estuvieron presentes y pudiéramos concentrar toda nuestra atención en ID. Por otra parte no hay razones para presumir que nosotros no veríamos el panel de la ventana en su propio lugar si los fósforos no estuvieran presentes. Hay aparentemente una competencia entre las dos imágenes estereoscópicas ID y W. Todas las ventajas sin embargo están de lado de W, porque el panel de la ventana puede ser observado con los principios 1, 2a y 2b y eventualmente 3 en perfecta armonía, mientras que ID puede ser visto solamente de manera no

natural, es decir, convergiendo para W y acomodando digamos para 49 cm.²¹

Bajo estas condiciones no podemos mantener la acomodación artificialmente a 40 cm. sino que ésta cambiará gradualmente para la distancia W. Vemos en este ejemplo qué tan cuidadosos debemos ser en la interpretación y evaluación de los fenómenos estereoscópicos! Un análisis verdaderamente cuidadoso de las condiciones bajo las cuales aparece el fenómeno debe ser intentado antes de que saquemos conclusiones generales.

El experimento con los fósforos de v. F. D. no es en esencia diferente de la fusión de dos fotografías aéreas en una imagen estereoscópica sin la ayuda de lentes, y por lo tanto completamente comparable al caso III de la figura 19. Basta sustituir Id (imagen del fósforo izquierdo, observada con el ojo derecho) por IFd (imagen de la fotografía izquierda, observada con el ojo derecho), Ii por IFi, etc. como se indica en la figura 21b. Entonces debiera presentarse la fusión de IFi y DFd.

La fusión estereoscópica de dos fotografías aéreas causa alguna dificultad al fotointérprete inexperto, y en conexión con el experimento del fósforo podemos darle alguna indicación, que lo dirija a un rápido resultado una vez que comprenda cómo y qué tiene que hacer. La principal dificultad para el novicio es que no sabe mantener los ojos como si fijara un punto detrás de las fotografías. Presentamos dos métodos para obtener este resultado. En el primer método debe acordarse de los momentos de su primera juventud, cuando soñaba con aventuras durante las largas y tediosas horas de escuela, completamente abstraído a causa de su fantasía, sin tener en cuenta al maestro, a sus condiscípulos ni las cosas que lo rodeaban en la sala de clase. Cuando la mente está en este estado, los ojos se encuentran completamente en descanso, acomodados para el infinito con los ojos visuales paralelos.

Esta es la manera en que tiene que mirar a las fotografías: descansadamente, sin prestarles mucho interés y sin mucha atención, pero sin embargo de manera tal que note que las fotografías aparecen dobles en sus contornos generales. Si tenemos suficiente separación en las fotografías las veremos como está indicado en la figura 21b, parte superior. Tenemos ahora que disminuir la distancia entre las fotografías en forma tal que las dobles imágenes interiores (IFi y DFd) se cubran una a otra superponiendo los correspondientes detalles. Prestando gradualmente más atención a las fotografías, el estereoscopismo aparecerá.

El segundo método es mantener las fotografías en el vidrio de una ventana. Mirando con atención un objeto distante a través de la ventana, veremos las fotografías doblemente si las mantenemos sobre el vidrio algo debajo del objeto observado; el resto del procedimiento es el mismo.

(21) No para 30 cm., porque la acomodación está acoplada con la convergencia: esto es la causa para que ID no pueda ser vista con mucha claridad.

Un momento difícil puede sobrevenir al separar o acercar las fotografías en forma tal que las imágenes IFi y DFd coincidan: Trasladando la atención, del objeto distante a estas imágenes que coinciden, tenemos que ejecutar el truco de que los ojos mantengan la convergencia para el objeto distante pero se acomoden para una distancia más pequeña. Tenemos que aflojar la conexión entre convergencia y acomodación. Es muy probable que los intérpretes más experimentados puedan avanzar más que aquellos que no tienen experiencia, y como cierto grado de desconexión entre esos dos principios es de alguna influencia en la determinación de los puntos virtuales de fijación podemos esperar una curva ligeramente diferente (la de la figura 16) para diferentes intérpretes.

CONCLUSIONES

Todos los fenómenos de visión estereoscópica conocidos hasta ahora pueden ser explicados fisiopsicológicamente. Algunos aspectos necesitan investigación más avanzada, como por ejemplo el misterioso principio 2b. Muchas cuestiones pueden ser solucionadas solamente en un laboratorio bien equipado, sin embargo, quedan bastantes problemas que pueden ser investigados por el foto-intérprete sin mucho equipo. A este respecto puede mencionarse lo siguiente: determinación de los puntos de fijación virtual para todos los casos de visión estereoscópica y los diferentes estados de acomodación (experimentos similares al descrito en la Sección III); variaciones de estos valores para diferentes personas, variabilidad en la estimación para una sola persona, etc. En esta forma podemos conseguir mejores aproximaciones que con suposiciones puramente geométricas²² sin fundamento fisiopsicológico, suposiciones que, aun cuando son útiles por el momento, no nos llevarán a resultados definitivos.

BIBLIOGRAFIA

- Von Frijtag Drabbe, C. A. J. "Some new aspects in stereoscopic vision", Photogrammetria VIII, 1951-1952, Número 4, Special Congress Number.
- Von Tschermak-Seysenegg, A., "Einfuehrung in die physiologische Optik", Viena, Springer, 2-a ed., 1947.
- Landois-Rosemann, "Physiologie des Menschen", Muenchen-Berlin, 28-a ed., 1950.
- Sahli, H., "Lehrbuch der klinischen Untersuchungsmethoden fuer studierende und praktische Aertzte", Vol. III, Leipzig-Viena, 7-a ed., 1932.

(22) Fórmula de aproximación de E. R. Goodale.

—Eardley, A. J., "Aerial Photographs: Their use and interpretation", Harper, New York-London.

—Best and Taylor, C. H. and N. N., "The physiological basis of medical practice", Baltimore, 5-a ed., 1950.

—Salzman, M. H., "The factors in human vision applicable to photogrammetry", Photogrammetric Engineering, Vol. XV, número 4, dic. 1949.

—Goodale, E. R., "An equation for approximating the vertical exaggeration ratio of a stereoscopic view", Photogrammetric Engineering, Vol. XIX, Número 4, pp. 607-616, sept. 1953.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea agradecer a las siguientes personas, quienes en una u otra forma han ayudado a la preparación de este artículo: Dr. Gottfried Stiasny por las estimulantes discusiones sobre tópicos anatómicos o fisiológicos y por poner su biblioteca médica a disposición del autor; Wilford W. Fraser, fotogeólogo-jefe de la International Petroleum (Colombia) Ltda., por las muchas sugerencias que mejoraron tanto el texto como las ilustraciones; Jan Keizer, Alberto Ronderos y Jaime Torres, fotogeólogos compañeros del Instituto Geológico Nacional de Colombia, por haber revisado el artículo; Anton Tomic por la continua cooperación en todas las fases de la preparación de las figuras y de los textos, inglés y castellano. Los gráficos fueron dibujados por Alberto Cruz y Dabeyba Giraldo de Cuervo quien además colaboró en la revisión del texto español.

ABSTRACT

An analysis of the phenomena involved in stereoscopic vision leads to the conclusion that stereoscopy is based on physiologic processes. A definite distinction should be made between the natural stereoscopic vision in daily life and the unnatural conditions of observation as for instance under a stereoscope. In the first case, characteristic physiologic factors are in complete harmony, whereas conflicting tendencies appear for cases of unnatural vision. The relative strengths of several disharmonic factors determine the place of the observed stereomodel. Stereoscopic vision with parallel or diverging visual axes can thus be explained on a physiologic basis. A simple assumption enables us to extend the projection theory for these cases and to reconstruct geometrically the observed stereomodel. All properties of this stereomodel such as horizontal scale, vertical scale, and vertical exaggeration can then be determined for all cases of stereoscopic vision.