

# ADAPTACIÓN A LA LUZ, LEY DE WEBER, SUMACIÓN ESPACIAL

## AUTOR

**Thomas Salmon:** Northeastern State University, EEUU

## PAR REVISOR

**Scott Steinman:** Southern California College of Optometry, EEUU

## ESTE CAPÍTULO INCLUIRÁ UNA REVISIÓN DE:

- Adaptación a la luz
- Aplicación clínica
- Sumación espacial

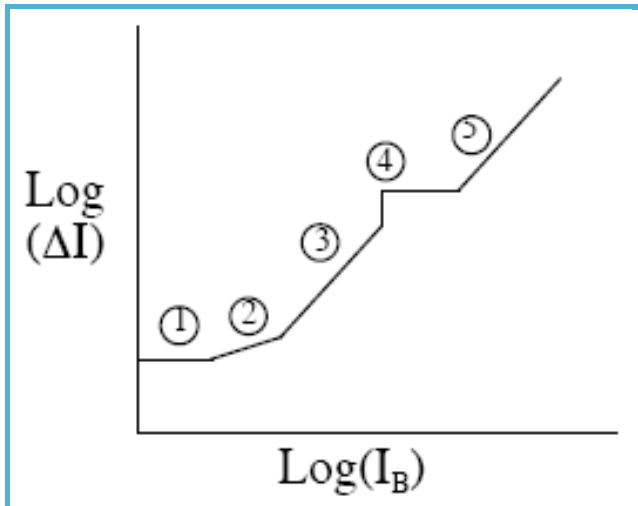
## ADAPTACIÓN A LA LUZ

Así como los ojos ajustan su sensibilidad al pasar de la luz a la oscuridad, también tienen la capacidad de ajustarse al pasar de la oscuridad a la luz. Esto se conoce como **adaptación a la luz**. La adaptación a la luz se evalúa midiendo la capacidad de una persona para detectar una luz tenue sobre un fondo uniforme (aumento del umbral) a medida que se aumenta gradualmente la iluminación del fondo. Esto se ilustra en Schwartz, 2004 Fig. 3-15.

La figura 3-15A muestra como estímulo una luz en el centro de un anillo que representa la luz del fondo. En un principio el paciente se adapta completamente al fondo oscuro (anillo). Luego se aumenta la luminancia del centro un gradualmente por encima de la del fondo hasta que pueda detectarse. Después, la luminancia del anillo se aumenta. El paciente se adapta al nuevo brillo del fondo y de nuevo se determina la el mínimo incremento de luminancia por encima del fondo que el paciente puede detectar. El proceso continua con un fondo cada vez más brillante.

## ADAPTACIÓN A LA LUZ (CONT.)

Los resultados más comunes de dicho experimento se muestran en la figura 9.1. Las secciones de la curva numeradas del 1 al 4, muestran la adaptación a la luz de los bastones. Después de el numeral 4, los conos empiezan a funcionar.



**Figura 9-1:** Logaritmo de incremento de la luminancia ( $\Delta I$ ) graficado en función del logaritmo de luminancia del fondo ( $I_B$ ). Las secciones 3 y 5 tienen pendientes iguales a 1.0 las cuales indican que la ley de Weber se mantiene a lo largo de casi todo el rango escotópico respectivamente. (Gracias a Andrew Carkeet, PhD (Singapore) por sus sugerencias en esta figura. Compare esta figura con Schwartz Fig. 3- 15)

### Note lo siguiente:

- **Sección 1** - Fondo muy oscuro, el ruido neural ( o “luz oscura”) determina el incremento ( $\Delta I$ ) requerido para la detección
- **Sección 2** - Aun hay una muy baja iluminación del fondo; Las fluctuaciones en la iluminación del fondo (anillo) determinan el incremento del umbral. La ley de DeVries-Rose predice que por encima de esta porción, el incremento ( $\Delta I$ ) se da en función de la raíz cuadrada de la iluminación del fondo ( $I_B$ )
- **Sección 3** -Es una sección larga que cubre un rango de 4 unidades log y que tiene una pendiente de alrededor de 1 (Cuando se grafica en coordenadas log/log). Esto indica que el incremento ( $\Delta I$ ) se da en una proporción constante del fondo porque la ley de Weber aplica. Es decir, que sobre este rango el incremento del umbral es una fracción constante del fondo

La fracción constante se conoce con el nombre de **Fracción de Weber o constante de Weber** y será estudiada en mayor detalle más adelante (Schwartz C 11). La fracción de Weber para bastones es  $\sim 0.14$ . Por lo tanto si la luminancia del fondo es 100, se requiere un incremento de 14 por encima del fondo para detectar el estímulo. Si la luminancia es 1000, el incremento debe ser de 140. Esto ilustra un principio importante de la percepción visual. El ojo está diseñado para responder a diferencias relativas en la luminancia (o radios de niveles de luz) más que para niveles absolutos de luminancia. Esto se relaciona estrechamente con el concepto de contraste, el cual también se estudiará en mayor detalle más adelante.

También significa que la sensibilidad, en términos de la capacidad para detectar un incremento absoluto, disminuye al aumentar la iluminación. Esto es necesario para que el ojo opere en un rango amplio de iluminación y se conoce con el nombre de **regulación de la sensibilidad o control de la ganancia**.

- **Sección 4** Muestra una pendiente infinita lo que indica que los bastones están saturados y en su límite. Esto se da cuando solo un  $\sim 10\%$  de la rodopsina se blanquea.
- **Sección 5** Muestra la porción del cono. También permite mostrar una pendiente constante de 1.0, por lo tanto, la ley de Weber es válida para conos. La fracción de weber para los conos es de  $\sim 0.015$ . Los conos por lo tanto muestran una menor reducción relativa en la sensibilidad al aumentar la iluminación que la de los bastones.

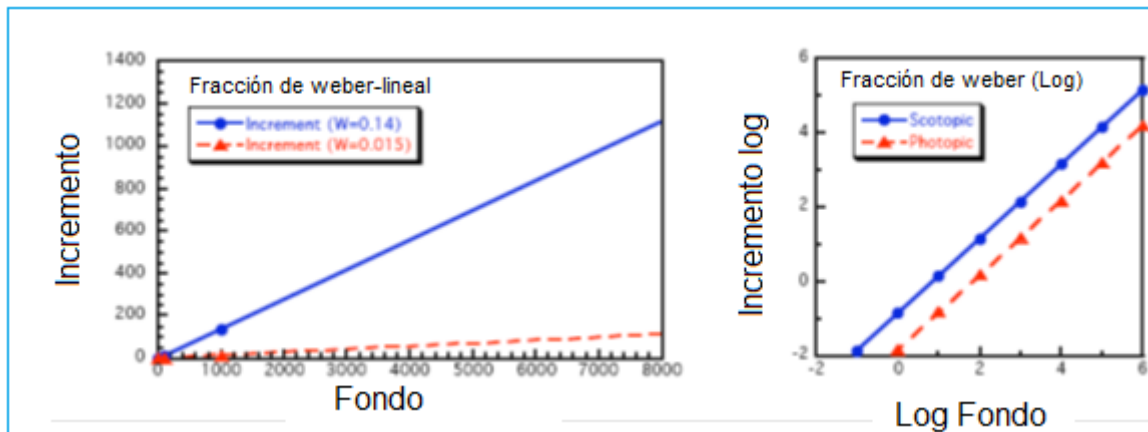
## ADAPTACIÓN A LA LUZ (CONT.)

El punto más importante para observar en la figura 9.1 es que las pendientes para las secciones 3 (rango escotópico) y 5 (rango fotópico) son iguales a 1.0. En ejes log-log, esto ocurre cuando el incremento de los valores ( $\Delta I$ ) son una fracción constante del fondo (IB). Esto es consistente con la ley de Weber, que dice que el incremento de un umbral en una prueba psicofísica será una fracción determinada (Fracción de weber) (Fig 9.2) del fondo.

La siguiente tabla y las figuras muestran que, cuando se mantiene la ley de weber, y un incremento logarítmico del umbral se grafica en función de la intensidad logarítmica del fondo, la pendiente es igual a 1.0.

Tabla 9-1: La siguiente tabla y las figuras muestran que, cuando se mantiene la ley de weber, y un incremento logarítmico del umbral se grafica en función de la intensidad logarítmica del fondo, la pendiente es igual a 1.0. Esto es cierto para cualquier **valor de la fracción de Weber**.

FONDO	LOG FONDO	INCREMENTO (W = 0.14)	INCREMENTO LOG	INCREMENTO (W = 0.015)	INCREMENTO LOG
0.1	-1.00	0.014	-1.85	0.0015	-2.82
1	0.00	0.14	-0.85	0.015	-1.82
10	1.00	1.4	0.15	0.15	-0.82
100	2.00	14	1.15	1.5	0.18
1000	3.00	140	2.15	15	1.18
10000	4.00	1400	3.15	150	2.18
100000	5.00	14000	4.15	1500	3.18



**Figure 9-2:** Cuando la relación resumida por la ley de weber se grafica en ejes lineales, la pendiente es igual a la fracción de weber. Cuando se grafica en ejes grandes, la pendiente es igual a 1.0 para ambas líneas.

## APLICACIÓN CLÍNICA

La ley de Weber tiene algunas aplicaciones importantes para la optometría clínica.

### BUSCANDO CÉLULAS EN LA CÁMARA ANTERIOR DURANTE UN EXAMEN DE BIOMICROSCOPIA

Las lesiones en la córnea o en el segmento anterior generalmente causan iritis, esto libera leucocitos a la cámara anterior. Los doctores usan este signo (células en cámara anterior), para diagnosticar y monitorear la iritis. Para bajos grados de iritis las células son muy difíciles de ver, especialmente para profesionales con poca experiencia. Esto sucede porque el contraste de las pequeñas células sobre un fondo oscuro que proporciona la pupila es bajo. El contraste puede aumentarse incrementando el brillo de la lámpara de hendidura. Esto aumenta el valor  $\Delta I$ , mientras que el fondo (pupila) se mantiene igual. Si se aumenta el  $\Delta I$  a tal punto de que exceda la fracción de Weber, las células serán visibles para el examinador.

## APLICACIÓN CLÍNICA (CONT.)

### EXAMEN DEL CAMPO VISUAL

Esta también fue una consideración importante en el diseño del Campímetro visual Humphrey. Citando a Anderson y Patela pag 21 y 22 de la perimetría automatizada estática ( 2da Ed. Mobsy, St. Louis, 1999):

*La intensidad de la iluminación del fondo de campímetro afecta el umbral visual. De hecho, determina el estado de la luz versus la retina adaptada a la oscuridad. La visibilidad de un estímulo no es dependiente únicamente de la intensidad lumínica; también depende del contraste con la iluminación del fondo.*

El contraste de un objeto observado (un estímulo) con su fondo es de hecho el factor más importante para su visualización en condiciones fotópicas. Cuando el umbral de visibilidad está estrictamente determinado por el contraste, la representación matemática del umbral de intensidad del estímulo es una constante si se expresa como el radio de contraste (Conocida como la fracción de weber) de la intensidad del estímulo a la intensidad del fondo (Ley de Weber)

Existen ventajas teóricas si la campimetría se realiza con un fondo lo suficientemente intenso para mantener la ley de weber. Primero, aumentar o disminuir el área pupilar tiene poco efecto en el contraste de un estímulo porque ambos fondos y estímulos se afectan por igual. Segundo, pequeños cambios en la intensidad del fondo no cambian la visibilidad de un estímulo si su intensidad cambia en igual porcentaje. Goldmann tomó ventaja de este principio para mejorar la confianza de su perímetro. Sólo tiene una bombilla de luz, que provee tanto la iluminación del estímulo como del fondo y si la bombilla varía su intensidad (variaciones en el voltaje eléctrico), tanto la intensidad del estímulo como la intensidad del fondo se afectan por igual- el contraste, y por tanto la visibilidad del estímulo, se mantiene prácticamente constante.

## SUMACIÓN ESPACIAL

Con el fin de ver en un amplio rango de niveles de iluminación, se necesitan características especiales provistas por los sistemas escotópico y fotópico.

### SISTEMA FOTÓPICO

- Opera cuando la iluminación retiniana es alta
- La luz es abundante
- Está diseñado para proveer la visión del detalla; AV, sensibilidad al contraste, visión del color etc.
- Compromete la sensibilidad absoluta

### SISTEMA ESCOTÓPICO

- Opera cuando la iluminación retiniana es baja
- La luz es poca y los fotones están dispersos
- Diseñado para proveer la sensibilidad máxima: Detección de umbrales bajos
- Compromete la calidad de la visión (baja AV, baja resolución espacial, ausencia de percepción al color, etc)

**Citando de Schwartz, 2004 p. 44-45:**

*Mientras que la resolución visual y la sensibilidad al contraste son mejores bajo condiciones fotópicas, la sensibilidad absoluta es mejor bajo condiciones escotópicas. Este intercambio entre la resolución visual y la sensibilidad visual se debe, en gran parte, a la manera en la que los conos y los bastones están conectados a los elementos post-receptor de la retina. Los bastones están conectados de esa forma con el fin de sumar la información del tiempo y el espacio. Esto produce una gran sensibilidad, pero, muy baja resolución. Los conos, por otro lado, manifiestan conexiones que maximizan la resolución visual a expensas de la sensibilidad.*

La Fig. 3-16 (arriba ) de Schwartz ilustra el flujo de información de una gran cantidad de bastones que recolectan la luz de una gran porción de la retina y unen su información en una célula ganglionar. Para interpretar esta figura, recuerde el estudio realizado por Hecht et al que decía que un mínimo de 10 fotones debe absorberse por un grupo de bastones muy cercanos con el fin de detectar la luz. Dos luces separadas una de la otra brillan sobre una zona retiniana que tiene gran cantidad de bastones, los cuales están conectados a una célula ganglionar. Ya que todos

estos bastones envían la información a la misma célula ganglionar, el efecto de la estimulación lumínica de estos bastones se suma o fusiona y se procesa como una sola señal en un solo punto de luz. En este caso, la señal para 10 fotones absorbidos se combina. Note que la célula ganglionar solo puede procesar la presencia de una luz, incluso aunque dos puntos de luz (5 fotones cada uno) brillen en determinada zona retiniana.

La fig 3-16 de Schwartz (Abajo) muestra la organización de los conos. Son menos los conos que están conectados a una sola célula ganglionar. Todos cubren una zona más pequeña de la retina. Asumamos que el mismo estímulo mencionado anteriormente (dos puntos de baja intensidad lumínica, pero más cerca el uno del otro) ilumina la retina. Asuma que el umbral para detectar una luz recibida por una célula ganglionar es de 10 fotones provenientes de la señal de los fotorreceptores. Esto se ilustra en el siguiente ejemplo, cada grupo de conos conectado a cada célula ganglionar recibe solo 5 cuantos de estímulo de su grupo respectivo de conos. Esto está por debajo del umbral y no puede percibirse. En cambio si se duplica el brillo para que hayan 10 fotones en cada punto, la energía será suficiente para estimular cada célula ganglionar. Ya que se estimulan dos células ganglionares separadas, las dos luces se verán como 2.

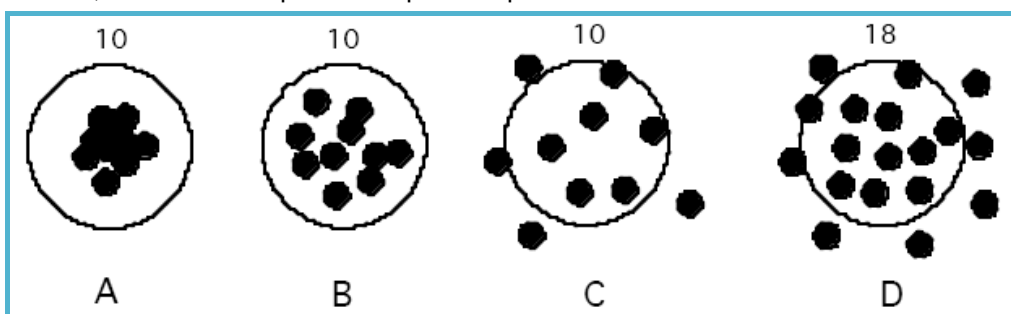
En el sistema escotópico, las células ganglionares reciben estímulos de una gran número de bastones (300+). De hecho, integra todos los estímulos recibidos en esta área. A eso se le conoce con el nombre de sumación espacial. El estímulo recolectado a lo largo de un área se suma y es procesado como una sola señal.

El beneficio de la sumación espacial es que nos permite ver bajo muy bajas condiciones de iluminación. Por otro lado, una sumación espacial muy grande resulta en muy baja resolución, es decir, baja agudeza visual. La agudeza visual escotópica es de tan solo 20/200, siendo la mejor AV corregida. Los pacientes con distrofias pueden tener AV de dichos niveles.

Los conos conectados a una sola célula ganglionar son menos, por tanto la sumación espacial es más pequeña que la de los bastones. Los tamaños de las áreas de sumación varían en diferentes partes de la retina y son de menor tamaño en la fóvea donde cada fotorreceptor cono tiene su propia célula ganglionar. Esto nos permite tener una muy buena agudeza visual (20/15 o mejor) en la fóvea, pero muy poca sensibilidad para detectar luces de baja intensidad. En general, las enfermedades que afectan la retina periférica inicialmente, como el glaucoma, conservan la agudeza visual.

### LEY DE RICCO

Cuando se está intentando determinar el número mínimo de cuantos que puede detectar el ojo, como lo hizo Hecht et al, ¿en qué afecta los resultados el tamaño del objeto? Esto depende en qué tan grande sea el área de sumación espacial. En el caso de Hecht, él encontró que a medida que la luz caía en un área de con un diámetro de 10 minutos de arco, el número de cuantos requeridos para alcanzar el umbral era constante.



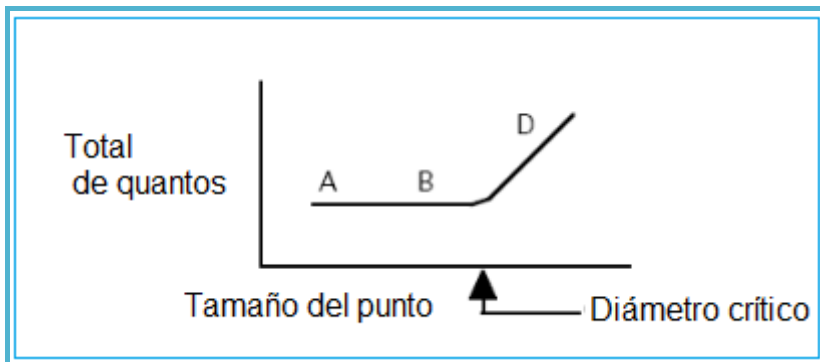
**Figura 9-3:** Diversas distribuciones de 10 fotones a lo largo de un campo de sumación espacial en la retina.

La figura 9-3 muestra un patrón de puntos para luces de varios tamaños brillando sobre un área de sumación. Cada punto representa un fotón. En la imagen A, el tamaño del punto es pequeño y todos los fotones caen en el área de sumación. En la imagen B, el punto es más grande, pero sigue siendo más pequeño que la zona de sumación, por tanto todos los fotones son recolectados y su señal se envía a una sola célula ganglionar. En la imagen C, el diámetro del punto es mayor que la zona de sumación y algunos fotones caen por fuera del área de sumación. El área de sumación, por tanto, recolecta menos de 10 fotones y una señal sub-umbral será enviada a una célula ganglionar. La luz no será vista, es decir, que el nuevo estímulo lumínico de mayor diámetro no es lo suficientemente intenso como para que la persona la detecte. En la imagen D, el tamaño del punto es el mismo que la imagen C, pero, la densidad de fotones es mayor y el número de fotones de umbral caen dentro del área de sumación.

Si un total de diez cuantos de absorción dentro del área de sumación son requeridos para la detección de un estímulo lumínico, no importa que tan grande sea el estímulo, siempre y cuando caiga dentro del área de sumación. Si el estímulo es más grande que el área de sumación, algunos fotones caerán por fuera de esa área y la absorción de cuantos será menor a 10. Un estímulo lumínico grande debe contener más fotones para asegurar que al menos diez caigan dentro del área de sumación.

La figura 9-4 ilustra la **ley de Ricco** basado en el principio ilustrado en la figura 9-3. La ley de Ricco también puede describirse con la siguiente ecuación matemática ( $I \cdot A = K$ ) que menciona que, dentro de un **diámetro crítico**, el producto del área de la imagen y la intensidad lumínica (quantos/área) es constante. En otras palabras, para un área de cualquier tamaño que sea más pequeña que el diámetro crítico, el total de quantos ( $I \cdot A$ ) requeridos para detectar un estímulo luminoso es constante. Si el área iluminada es mayor al diámetro crítico, se requerirán más quantos como se mostró en la región ascendente de la curva en la figura 9-4.

$$I \cdot A = K$$



**Figura 9-4:** Ley de Ricco

**Tabla 9-2:** Resumen del intercambio entre sensibilidad y agudeza visual para el sistema fotópico y escotópico.

SISTEMA	AREAS DE SUMACIÓN	SENSIBILIDAD	RESOLUCIÓN ESPACIAL
Escotópica	Grande (up to 300+ rods)	excelente	mala (20/200)
Fotópica	Pequeña I (fovea: 1 cone)	mala	excelente (20/15)

## LECTURAS SELECCIONADAS /REFERENCIAS

- Schwartz SH. **Visual Perception - A Clinical Orientation, 3rd Edition**. Appleton & Lange, Stamford, Connecticut, 2004