



SUMACIÓN TEMPORAL, EFECTO STILES-CRAWFORD

AUTOR

Thomas Salmon: Northeastern State University, EEUU

PAR REVISOR

Scott Steinman: Southern California College of Optometry, EEUU

ESTE CAPÍTULO INCLUIRÁ UNA REVISIÓN DE:

- Ley de Ricco
- Sumación temporal y ley de Bloch
- Efecto de Stiles-Crawford
- Resumen de dualidad retiniana

LEY DE RICCO

La ley de Ricco (sumación espacial) menciona que dentro de un diámetro crítico, el número total de quantos requeridos para la detección de un umbral se mantiene constante. Citando de Schwartz, p 47:

La sumación espacial se representa matemáticamente con la ley de Ricco

$$IA = K$$

Donde ,
I = Intensidad del estímulo
A = área del estímulo
K = constante

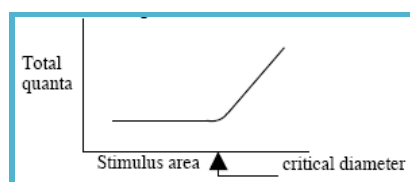


Figure 10-1: Ricco's law

Note que, según la ley de Ricco, lo que se mantiene constante es el producto de I por A, no I. Esto puede verificarse reemplazando los valores en la ecuación. El producto de I (quantos/área) y A (área) es un valor en quantos ya que los términos del área se cancelan. Como lo dice la ley de Ricco, dentro de un diámetro crítico, el número de quantos que se necesitan para alcanzar el umbral se mantiene constante.

$$\left(\frac{\text{quanta}}{\text{area}}\right)\left(\frac{\text{area}}{1}\right) = \text{quanto}$$

Por otro lado, si se cambia el valor por A (e.j el diámetro del punto), el valor no puede ser constante, pero debe cambiarse con el fin de que el producto de I por A se mantenga constante. Con el fin de que I x A se mantenga constante, I y A deben tener una relación recíproca. La siguiente tabla demuestra esto.

LEY DE RICCO (CONT.)

Tabla 10-1: Relación entre I y A

I (QUANTOS/ÁREA)	AREA	K (CONSTANTE)
10	1	10
5	2	10
2	5	10
1	10	10

Considere el siguiente ejemplo, como un modelo de pregunta :

Q. De acuerdo a la ley de Ricco (sumación especial), a medida que el punto es más pequeño el diámetro crítico, la intensidad necesaria para la detección de un umbral:

- A. Se mantiene constante para el tamaño de todos los puntos
- B. Debe aumentar a medida que aumenta el tamaño del punto
- C. Debe disminuir a medida que aumenta el tamaño del punto
- D. Es independiente al tamaño de los puntos

SUMACIÓN TEMPORAL Y LEY DE BLOCH

Así como el sistema visual suma la luz que recolecta por unidad de área, también suma la luz que recolecta por unidad de tiempo. El periodo de tiempo en el que se suma la cantidad de luz se conoce con el nombre de **duración crítica**. La sumación por unidad de tiempo se conoce con el nombre de **sumación temporal**.

El sistema escotópico tiene una duración crítica relativamente larga de 100 a 200mseg; toda la luz recolectada en este periodo de tiempo se cataloga como un flash de luz. Si el número total de quantos excede el umbral de detección, la luz será visible. Sin importar cuantos flashes se presenten en la duración crítica, todos serán vistos como uno solo. Con el fin de que dos flashes sean resueltos temporalmente como dos, deben estar separados en periodo de tiempo equivalente al menos a la duración crítica. La figura 3-18 ilustra esto.

El sistema fotópico tiene una duración crítica relativamente corta de 10 a 50 mseg como se muestra en la figura 3-19 de Schwartz. Con el fin de que los quantos de dos flashes se sumen, deben presentarse en una sucesión muy rápida. Esto le da al sistema fotópico una resolución temporal muy alta, pero menor sensibilidad que el sistema escotópico. La duración crítica para una sumación temporal puede variar según las condiciones del test. Mientras más larga sea la duración crítica del sistema escotópico permite recolectar fotones por unidad de tiempo, cuando éstos están disponibles. La duración crítica no se afecta con la longitud de onda. La duración crítica para la sumación temporal puede variar con las condiciones del test. Mientras mayor sea la duración crítica del sistema escotópico mayor recolección de fotones por unidad de tiempo, si éstos están disponibles. La duración crítica no se ve afectada por la longitud de onda.

El equivalente temporal de la ley de Ricco (sumación espacial) es la **ley de sumación temporal de Bloch**. Esta ley dice que dentro de la duración crítica, el número total de quantos requeridos para alcanzar el umbral se mantiene constante para diferentes duraciones de un flash. Por encima de la duración crítica, la luz requerida para la detección aumenta (Fig 3-20 Schwarz) Esto se expresa con la siguiente fórmula:

$$I(t) = K$$

Ya que "I" se expresa en términos de quantos/tiempo, el producto de I y t es el número total de quantos requeridos para la detección. La ley de Bloch también se conoce como **reciprocidad tiempo-intensidad**, ya que se necesita una disminución de la intensidad (I) para detectar la luz a medida que la duración (t) aumenta. Durante la duración crítica, la intensidad y duración son inversamente proporcionales, es decir, tienen una relación recíproca.

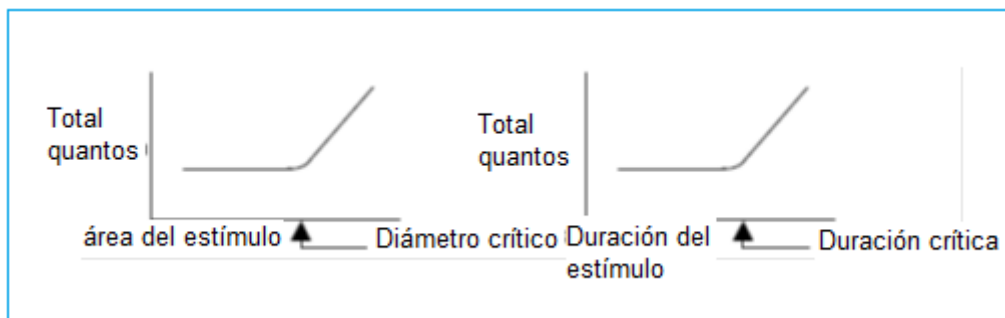


Figura 10-2: Comparación de la sumación temporal y espacial.

EJEMPLO HIPOTÉTICO DE LA LEY DE BLOCH

La ley de Bloch (sumación temporal) se mantiene siempre que se da durante la duración crítica. ¿Qué sucede si está más allá de esta duración?, ya no aplica y el número de cuantos contenidos en la luz debe aumentarse, tal y como se muestra en la región ascendente de la curva a la derecha en la figura 10-2.

Las figuras 10-3 a la 10-7 demuestran la ley de Bloch usando información hipotética de un experimento que mide el umbral de detección luminosa para diversos tiempos de exposición (duraciones).

Asuma que la duración crítica es de 4 mseg y deben incidir 20 cuantos en ese tiempo para ser visto. En la figura 10-3, se presenta una luz con una duración de 1 mseg y una intensidad de 20 cuantos/mseg. El número total de cuantos durante ese flash es de $20 \text{ cuantos/mseg} \times 1 \text{ mseg} = 20 \text{ cuantos}$. Los 20 cuantos inciden durante la duración crítica, por lo tanto el estímulo luminoso será visible.



Figura 10-3: Un flash de 1 mseg con una intensidad de 20 cuantos/mseg.

En la figura 10-4, se muestra una luz con una duración de 2 mseg y una intensidad de 10 cuantos/mseg. El número total de cuantos durante ese flash es de $10 \text{ cuantos/mseg} \times 2 \text{ mseg} = 20 \text{ cuantos}$. Los 20 cuantos están en el periodo de duración crítica, por lo tanto la luz aun será visible.

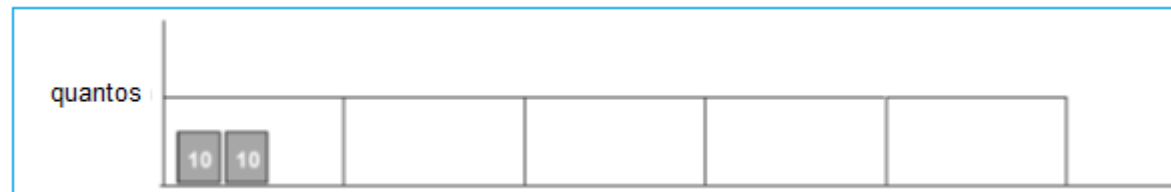


Figura 10-4: Un flash de 2 mseg con una intensidad de 10 cuantos/mseg.

En la figura 10-5, se muestra una luz con una duración de 4 mseg y una intensidad de 5 cuantos/mseg. El número total de cuantos durante ese flash es de $5 \text{ cuantos/mseg} \times 4 \text{ mseg} = 20 \text{ cuantos}$. Los 20 cuantos están en el periodo de duración crítica, por lo tanto la luz aun será visible.



Figura 10-5: Un flash de 4 mseg con una intensidad de 5 cuantos/mseg.

En la figura 10.6, se presenta una luz con una duración de 5 mseg y una intensidad de 4 cuantos/mseg. El número total de cuantos durante ese flash es de $4 \text{ cuantos/mseg} \times 5 \text{ mseg} = 20 \text{ cuantos}$. No todos los 20 cuantos se encuentran en la duración crítica; solo 16 lo están. Por tanto no son suficientes para alcanzar el umbral, y la luz no es vista. La intensidad debería entonces aumentarse a 5 cuantos/mseg para ser detectada. Ahora, si la luz de 5 mseg tiene una intensidad de 5 cuantos/mseg el total de cuantos sería igual a $5 \text{ cuantos/mseg} \times 5 \text{ mseg} = 25 \text{ cuantos}$. De estos 25, 20 se encontrarán en la duración crítica y la luz será visible.



Figura 10-6: Un flash de 5 mseg con una intensidad de 4 quantos/mseg.

En la figura 10-7, la luz tiene una duración de 10 mseg y una intensidad de 4 quantos/mseg. El número total de quantos durante el flash es de 4 quantos/mseg x 10 mseg = 40 quantos. Sin embargo, de esos 40 quantos, solo 16 inciden durante la duración crítica y esto no es suficiente para la detección. La intensidad debe aumentarse a 5 quantos/mseg, así el número total de quantos que inciden será igual a 5 quantos/ mseg x 10 seg= 50 quantos.



Figura 10-7: Flash de 10 mseg con una intensidad de 4 quantos/mseg

Los resultados de este experimento hipotético se muestran en la tabla 10.2 y en la figura 10.8

Tabla 10-2: Número total de quantos requeridos para la detección de varias duraciones.

	INTENSIDAD (QUANTOS/MSEG)	DURACIÓN (MSEG)	TOTAL DE QUANTOS
FIGURA 10-3	20	1	20
FIGURA 10-4	10	2	20
FIGURA 10-5	5	4	20
FIGURA 10-6	5	5	25

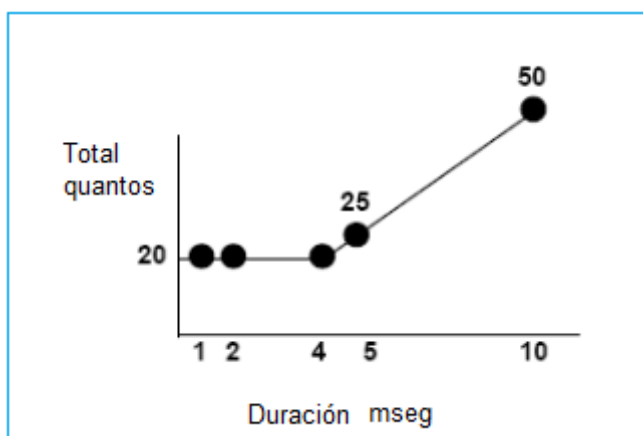


Figura 10-8: Gráfica de la tabla 10-2

EFECTO STILES-CRAWFORD

Los rayos de luz que entran por la zona periférica de la pupila, al ser refractados, inciden sobre la retina en ángulos oblicuos comparados con los rayos paraxiales, que inciden sobre la retina de manera perpendicular. Como los conos se comportan como **guías de onda** y concentran la luz de sus segmentos internos a través de sus segmentos

externos, capturan los fotones de manera más efectiva cuando el rayo incidente llega perpendicular al eje visual. Esto se ilustra en la figura 3-21 de Schwartz.

Los rayos de luz que inciden sobre un cono en un ángulo mayor al paralelo al cono son menos efectivos estimulando los conos. Por esta razón, la luz que entra de manera periférica a la pupila se percibe como más oscura que la luz que entra de manera paraxial. Esto se conoce como el efecto Stiles-Crawford de primer tipo, o simplemente como el **Efecto Stiles-Crawford**. El efecto Stiles-Crawford de segundo tipo se relaciona con la visión al color.

Citando de un artículo del Journal de la sociedad óptica americana por He, Marcos y Burns (Octubre 1999, p 2363-2369)

El brillo aparente de una luz cambia si su punto de entrada se mueve de un sitio a otro en la pupila del ojo humano. Este cambio en la eficiencia de la luminosidad relativa en función de la localización pupilar se conoce como el Efecto Stiles-Crawford de primer tipo (SCE-I). El cambio en la posición de la entrada pupilar para la luz incidente se asocia con un cambio en el ángulo de la luz en la retina y el cambio en la luminosidad con una posición de entrada pupilar es una medida de la sensibilidad angular de los receptores cono. La localización del pico de la función de eficiencia lumínica se interpreta como la localización en la pupila hacia la cual los fotorreceptores cono se orientan. La función de eficiencia lumínica se grafica típicamente como una distribución Gaussiana (o, de manera equivalente, la sensibilidad logarítmica se representa como un cambio parabólico con la localización pupilar); es decir,

$$S_{\text{pupil}} = S_0 \times 10^{-\rho\{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2\}}$$

En donde S_0 es la sensibilidad en la localización pupilar con máxima eficiencia lumínica (localizada en la posición x_0, y_0), x y y son las posiciones del test en la pupila y ρ (inverso de milímetros al cuadrado) representa un espacio constante (a mayor ρ , mayor direccionalidad).

Considerando solo dos secciones dimensionales de la pupila, dos ejemplos de SCE se muestran en la figura 10.9. La curva de abajo (mayor direccionalidad) muestra el SCE medido objetivamente ($\rho=0.1$) y la curva de arriba muestra los resultados de medidas psicofísicas ($\rho=0.06$)

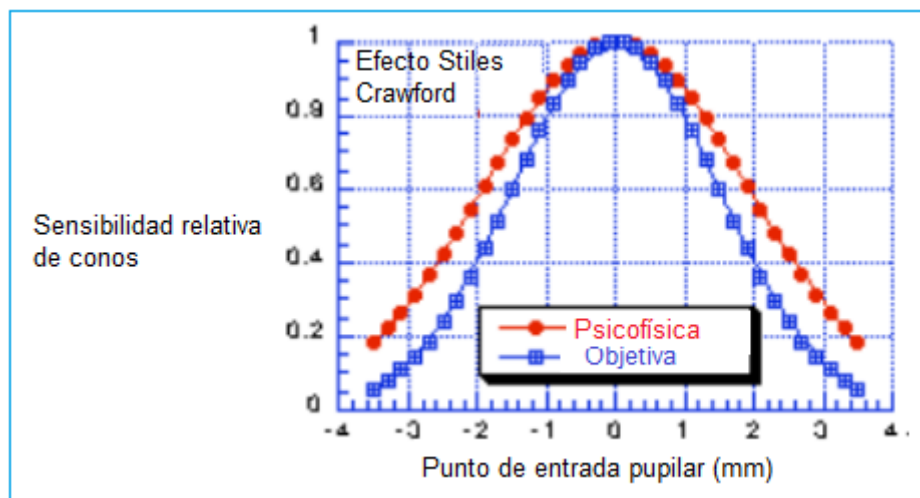


Figura 10-9: Sección horizontal del SCE con valores ρ de 0.06 (curva roja) y 01 (curva azul)

IMPORTANCIA CLÍNICA DEL EFECTO STILES-CRAWFORD

Susana Marcos, una científica que trabaja en the Instituto de Optica 'Daza de Valdéz' (CSIC) en Madrid, España, sugirió que la medida del efecto Stiles-Crawford podría permitir detectar enfermedades de los fotorreceptores. "Ya que la direccionalidad normal de los fotorreceptores requiere de una morfología normal del cono y una relación normal con el espacio extracelular, la direccionalidad de los fotorreceptores ha ganado interés clínico"

Tomado de (Marcos S, Burns SA. Cones spacing and waveguide properties from cone directionality measurements. J Opt Soc Am A16, 995-1004 (1999).)

Existen otras aplicaciones clínicas importantes del SCE. En cirugía refractiva los pacientes pueden experimentar menos visión con diámetros pupilares mas grandes por las aberraciones ópticas periféricas de la córnea. Los pacientes con pupilas más pequeñas probablemente tienen mejor visión luego de una cirugía refractiva que aquellos con pupilas más grandes. El SCE ayuda a mitigar los efectos adversos de las aberraciones periféricas ya que reduce la intensidad de la luz de los rayos que entran por la pupila periférica; los rayos que inciden con aberraciones ópticas

periféricas son por lo tanto menos brillantes y molestan menos. Es como si la pupila fuera cubierta con un **filtro de densidad neutral** (figura 10-10). El SCE puede entonces, reducir el **tamaño efectivo de la pupila** para que sea menor al tamaño de la pupila física. Una investigación por Salmon y West da un ejemplo de la diferencia entre la pupila real y la efectiva.

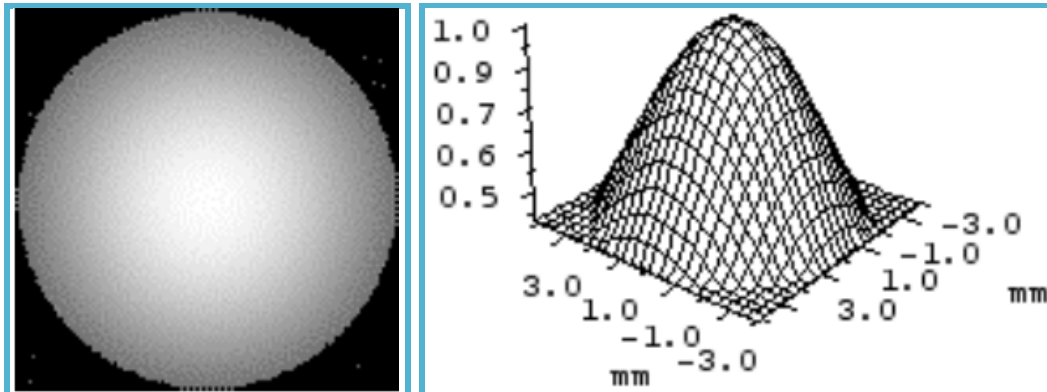


Figura 10-10: El SCE a veces se describe como una apodización de la pupila, mostrada en esta figura en una escala de grises (izquierda) y como una gráfica de superficie (derecha)

Otro beneficio del SCE es que ayuda a reducir el efecto de la dispersión de la luz sobre la imagen retiniana. La luz que se dispersa dentro del ojo incide sobre los conos en un ángulo oblicuo, pero gracias al SCE, esta luz no interfiere mucho con la luz que forma la imagen retiniana. Sin el SCE, la luz que se dispersa “emborronaría” la imagen, reduciendo su contraste y degradando la visión.

Los conos generalmente se encuentran apuntando hacia el centro pupilar para capturar fotones. Si por alguna razón la pupila se descentra, los conos cambiarán sus orientaciones para alinearse con el nuevo centro pupilar. Los experimentos han mostrado que si el centro pupilar está desplazado temporalmente, los conos cambiarán su orientación y si el centro pupilar recupera su posición original, los conos se re-orientarán a su posición original (Schwartz Fig 3-22). Esto muestra que los conos pueden moverse y reorientarse para encontrar su máxima efectividad.

No existe SCE para los bastones porque los segmentos internos no actúan como guías de onda y como resultado los bastones no reciben ningún beneficio en la reducción de las aberraciones por el SCE. Esto, sin embargo, no es un problema ya que la visión escotópica es incapaz de lograr una buena agudeza visual, por los grandes diámetros de las zonas de sumación espacial. Si, por ejemplo, las aberraciones emborronaran una imagen retinal a un equivalente de 20/40, la afección de esas aberraciones no sería percibida ya que el sistema escotópico solo es capaz de ver 20/200.

En el caso de la visión escotópica, es un beneficio que los bastones NO tengan SCE. Éstos aceptan la luz de un ángulo mayor y por lo tanto recolectan más fotones que los conos. De hecho, se benefician más de un gran diámetro pupilar. El resultado es una mejor sensibilidad bajo condiciones bajas de iluminación

A continuación se muestran algunas preguntas del SCE del Optometry Examination Review book, por Casser et al, 1986

#418 ¿Cuál de los siguientes contribuidores a la “perturbación de la luz” en un ojo joven tiene el menor efecto en la visión gracias al efecto Stiles-Crawford?

- A. Dispersión de la luz de la córnea
- B. Dispersión de la luz del cristalino
- C. **Reflexiones de la luz provenientes de la retina**
- D. Transmisión a través del iris
- E. Ninguno de los anteriores

#453 El efecto visual de la perturbación de la luz que se origina de la dispersión lumínica de la retina neural puede reducirse por:

- A. Punto de Maxwell
- B. **Efecto Stiles-Crawford**
- C. Birrefringencia de las fibras de Henle
- D. Fenómeno de Troxler
- E. El efecto Broca-Sulzer

RESUMEN DE DUALIDAD RETINIANA

La naturaleza dual de la retina nos permite ver en un gran rango de iluminación, desde iluminaciones muy bajas en una noche oscura, hasta muy altas en un día soleado. Nuestros ojos pueden ajustarse y ver bien dentro de un rango de 10 unidades log de diferencia en la luminancia de un objeto.

El sistema escotópico ha sido optimizado para operar en bajas condiciones. Se especializa en una alta sensibilidad; es decir, la detección de los objetos en una baja iluminación cuando los fotones están dispersos. Las siguientes características del sistema escotópico mejoran la sensibilidad, pero, comprometen la resolución visual:

- Zonas de sumación espacial de gran diámetro, que recolectan fotones de un área retinal grande.
- Un periodo crítico largo para la sumación temporal, con el fin de poder recolectar fotones por un gran periodo de tiempo.
- Ausencia de SCE, con el fin de que los bastones puedan recolectar fotones en grandes ángulos de luz.

El sistema fotópico funciona cuando la luz es abundante, por tanto no hay necesidad de “robar fotones”. Está diseñado con el fin de proveer información detallada de una escena visual. La visión fotópica nos provee una excelente resolución espacial (agudeza visual), alta resolución temporal (percepción de movimientos) y la visión del color. Las siguientes características mejoran la resolución y la visión del detalle, pero, comprometen la sensibilidad:

- Zonas de sumación espacial más pequeñas (en la fovea, cada cono tiene su célula ganglionar)
- Periodo crítico más corto para la sumación temporal
- La estructura de guía de onda y la motilidad dan origen al SCE, el cuál reduce la influencia de las aberraciones ópticas y la dispersión de la luz (pero también reduce la captura de fotones)
- Existencia de tres tipos de fotorreceptores, cada uno tiene un fotorreceptor diferente. Ésta es la base de la visión del color.

LECTURAS SELECCIONADAS/REFERENCIAS

- Casser Locke L, Chang FW, Gerstman DR and Pietsch PA. **Optometry Examination Review**. Appleton & Lange, 1986
- Marcos S, Burns SA. **Cones spacing and waveguide properties from cone directionality measurements**. J Opt Soc Am A16, 995-1004 (1999)
- Schwartz SH. **Visual Perception - A Clinical Orientation, 3rd Edition**. Appleton & Lange, Stamford, Connecticut, 2004