

Sensibilidad luminosa espectral del sistema visual

PERCEPCIÓN VISUAL

Tema 3

Profesora María Cinta Puell

Grado Óptica y Optometría

Universidad Complutense de Madrid

Contenido

- Métodos de medición de la eficiencia luminosa.
- Funciones de eficiencia luminosa fotópica y escotópica.
- Funciones de sensibilidad espectral fotópica y escotópica.
- Relación entre sensibilidad espectral y absorción espectral de ftopigmentos.
- Fotometría y radiometría: magnitudes fotométricas fundamentales.
- Iluminación de la retina
- Efecto Stiles-Crawford: selectividad direccional de la luz

Sensibilidad luminosa espectral

- La luminosidad que observamos de una determinada radiación depende de
 - la cantidad de energía
 - la longitud de onda

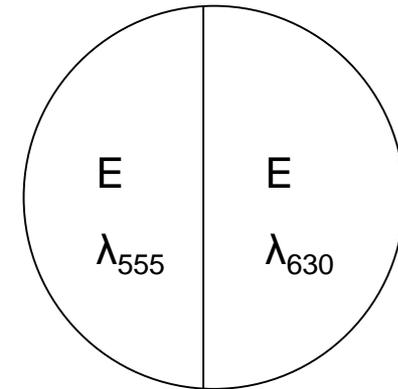
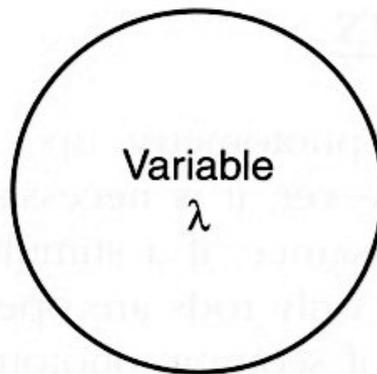
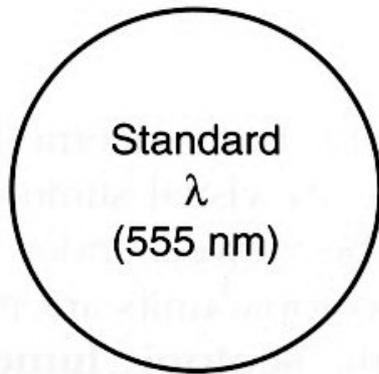
- Radiaciones con:
 - la misma energía (intensidad) pero
 - diferente longitud de onda
 - producen diferente sensación luminosa (brillo)

Métodos de medida de la eficiencia luminosa

- Medida de la eficiencia luminosa
 - Cantidad mínima de energía que produce sensación luminosa
 - **Fotometría:** se comparan dos estímulos compuestos por diferentes longitudes de onda
- Métodos
 - Fotometría directa heterocromática
 - Fotometría intermitente heterocromática

Fotometría directa heterocromática

Disposición de los estímulos para un experimento de igualación de brillo directo



Campo semi-circular para igualaciones de luminosidad

Tarea del observador:

Ajustar la radiancia de la muestra (longitud de onda variable) para que iguale la luminosidad de la longitud de onda estándar

Esta tarea se repite para cada longitud de onda del espectro

Fotometría directa heterocromática

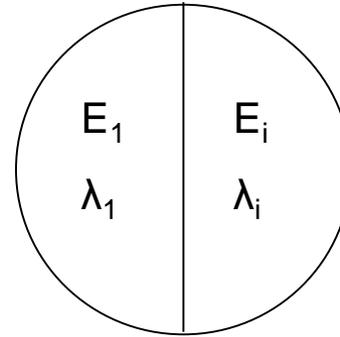
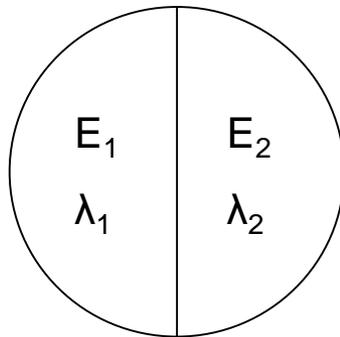
Dos fuentes luminosas de igual radiancia $E_1 = E_2$

Si las fuentes tienen igual longitud de onda $\longrightarrow L_1 = L_2$

Para radiaciones de diferentes longitud de onda $\longrightarrow L_1 \neq L_2$

Para igualar en luminosidad o brillo: $E_1 \cdot V_1 = E_2 \cdot V_2$

V_1 y V_2 = números positivos



Para todas las longitudes de onda $E_1 \cdot V_1 = E_i \cdot V_i$

Fotometría directa heterocromática

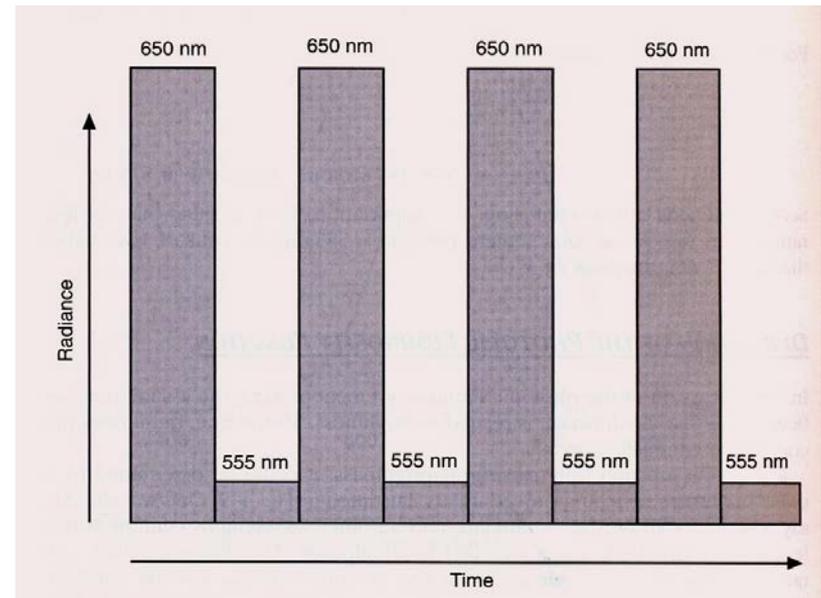
- Es difícil igualar el brillo de dos estímulos de colores diferentes
- Para evitar las diferencias notables de color en los semicampos:
 - Fotometría directa heterocromática paso a paso
 - 5 nm de diferencia entre ambos semicampos

Fotometría intermitente heterocromática

Dos estímulos monocromáticos se alternan en el tiempo con una frecuencia determinada y se produce la fusión de colores (solo se ve un color)

Tarea del observador:

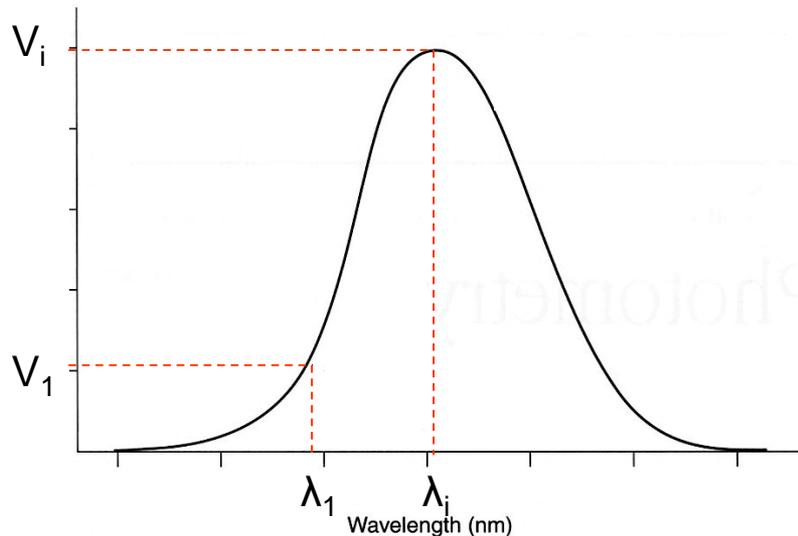
- ajustar la luminosidad de uno de los estímulos para minimizar la percepción de parpadeo.
- en ese momento, las longitudes de onda estándar y de muestra tienen la misma luminancia.



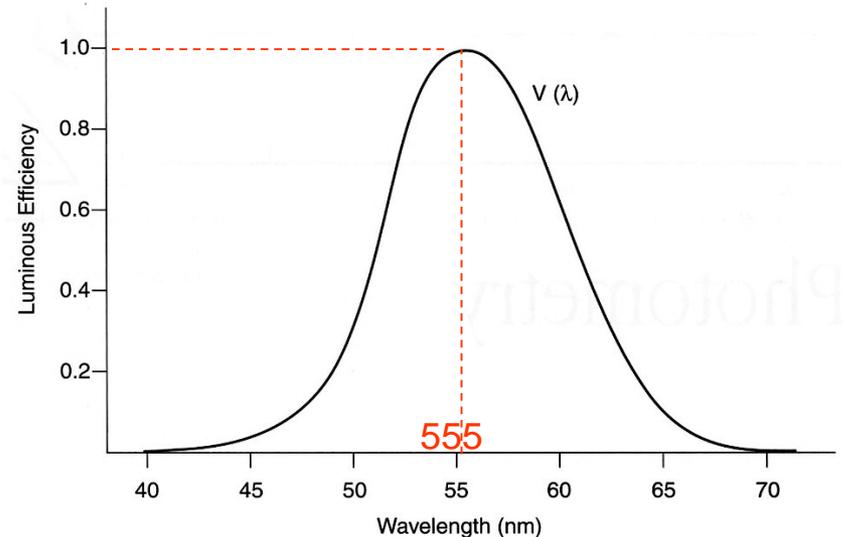
El procedimiento se repite en todo el espectro para obtener una **función de luminosidad fotópica** (resultados fiables)

La fotometría heterocromática produce la función de eficiencia luminosa fotópica (V_λ)

Curva con los valores de V_i medidos para un observador



Curva normalizada a la unidad

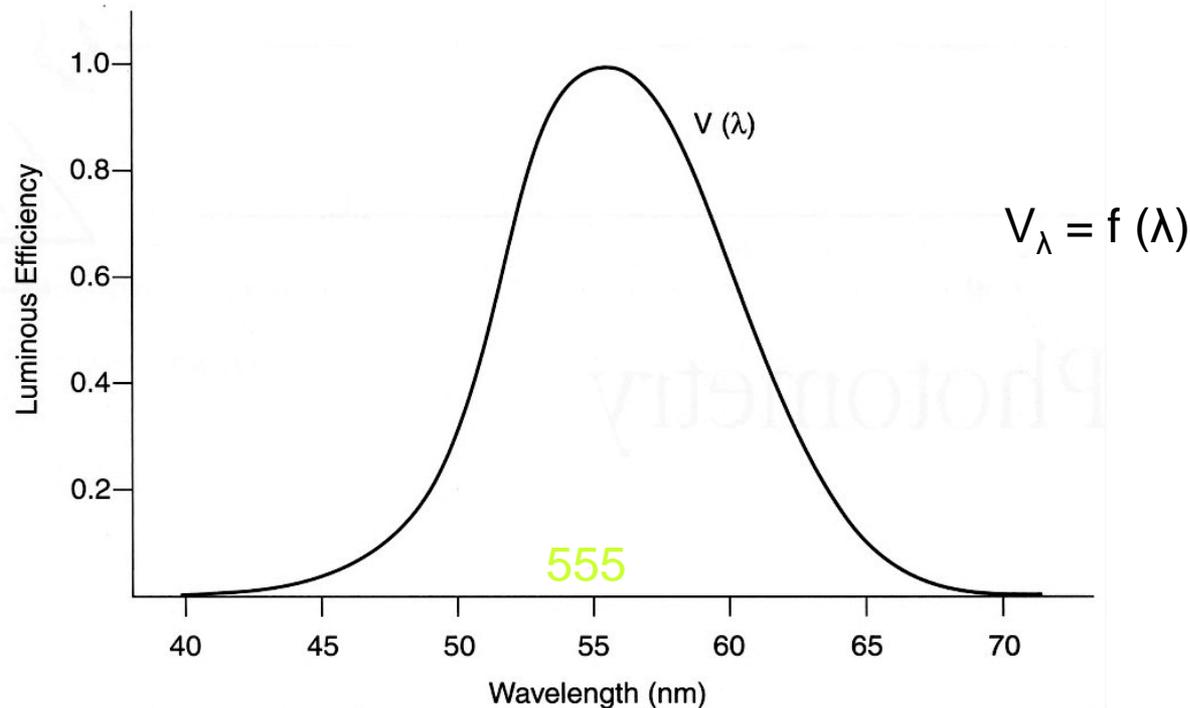


Eficiencia luminosa V_λ para cada longitud de onda

Curva de eficiencia luminosa del observador

Función de eficiencia luminosa fotópica

Una función de luminosidad o una función de eficiencia luminosa describe la **sensibilidad espectral** promedio de la percepción visual humana del brillo.



Curva de eficiencia luminosa fotópica, V_λ , del observador patrón CIE-1924

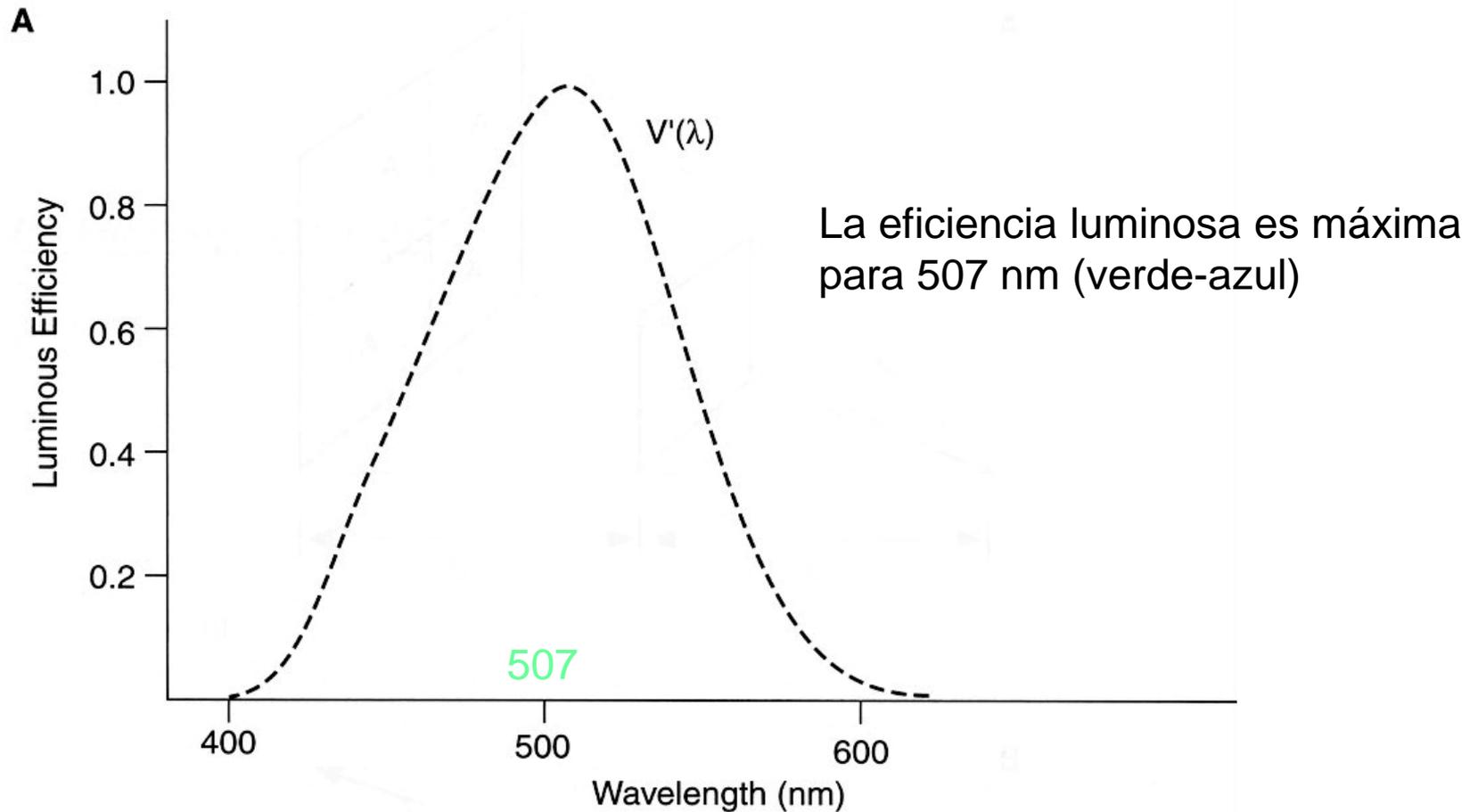
Función de luminosidad fotópica

Algunos valores de la curva de eficiencia luminosa fotópica del observador patrón

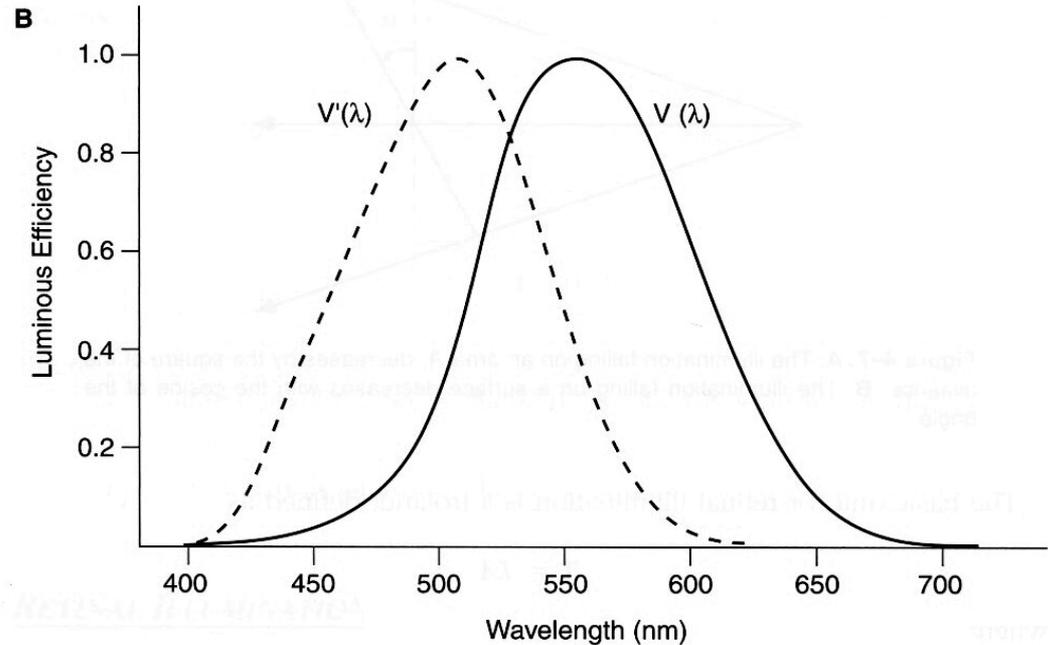
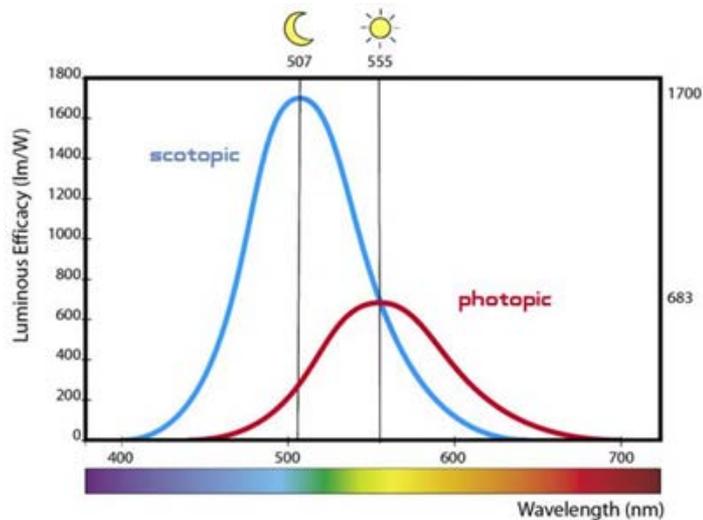
Longitud de onda (nm)	400	480	510	555	610	700
Sensibilidad relativa (V_λ)	0,0004	0,139	0,503	1	0,503	0,004

El máximo de eficiencia luminosa fotópica es a 555 nm (amarillo-verde)

Función de eficiencia luminosa escotópica



Funciones de luminosidad fotópica y escotópica

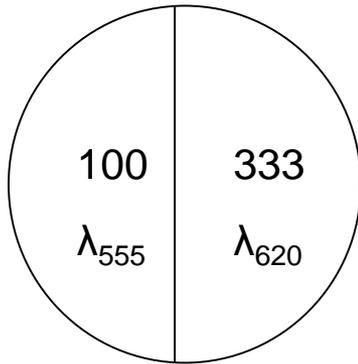


Datos normalizados:

- el valor máximo de cada curva se establece en 1
- Los picos de las curvas están al mismo nivel.

Ejemplo:

Igualación en visión fotópica y escotópica
con una radiación de 555 nm y otra de 620 nm



Condiciones fotópicas

para $\lambda = 555$ nm $v_{\lambda} = 1$ y para $\lambda = 620$ nm $v_{\lambda} = 0,3$

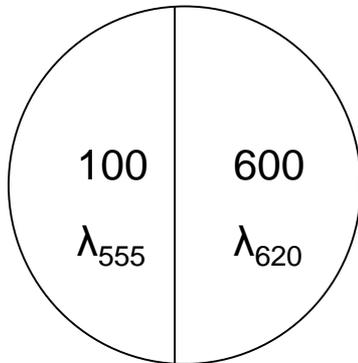
Igualación:

$$E_{555} \cdot v_{555} = E_{620} \cdot v_{620}$$

$$100 \cdot 1 = E_{620} \cdot 0,3$$

Sí $E_{555} = 100$ w/sr . m²

$$E_{620} = 333$$
 w/sr . m²



Condiciones escotópicas

para $\lambda = 555$ nm $v'_{\lambda} = 0,6$ y para $\lambda = 620$ nm $v'_{\lambda} = 0,1$

Sí $E_{555} = 100$ w/sr . m²

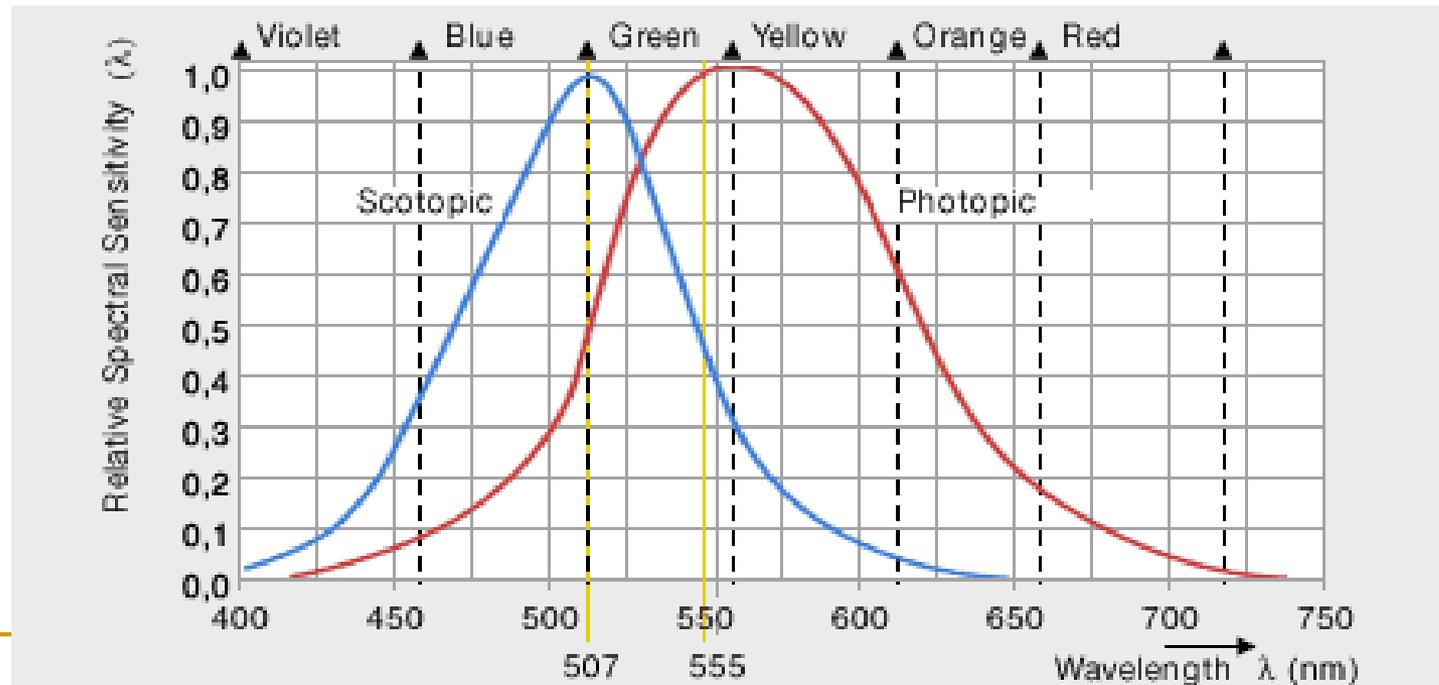
$$100 \cdot 0,6 = E_{620} \cdot 0,1$$

$$E_{620} = 600$$
 w/sr . m²

Funciones de sensibilidad espectral

La sensibilidad espectral es la eficiencia relativa de detección de luz en función de la longitud de onda (terminología neurociencia visual)

- La curva de sensibilidad espectral fotópica tiene un brillo máximo a 555 nm (amarillo-verde)
- La curva de sensibilidad espectral escotópica tiene un brillo máximo a 507 nm (verde-azul)

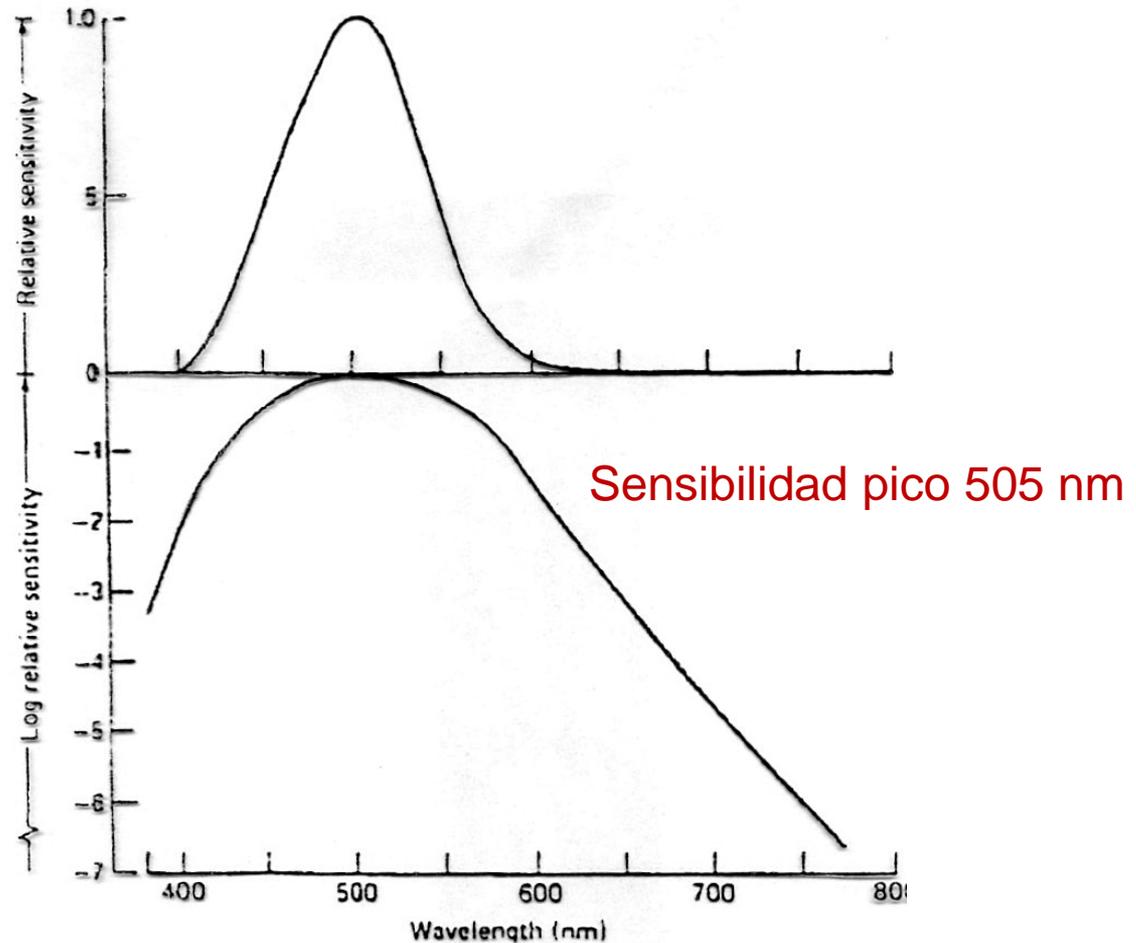


Sensibilidad espectral relativa escotópica

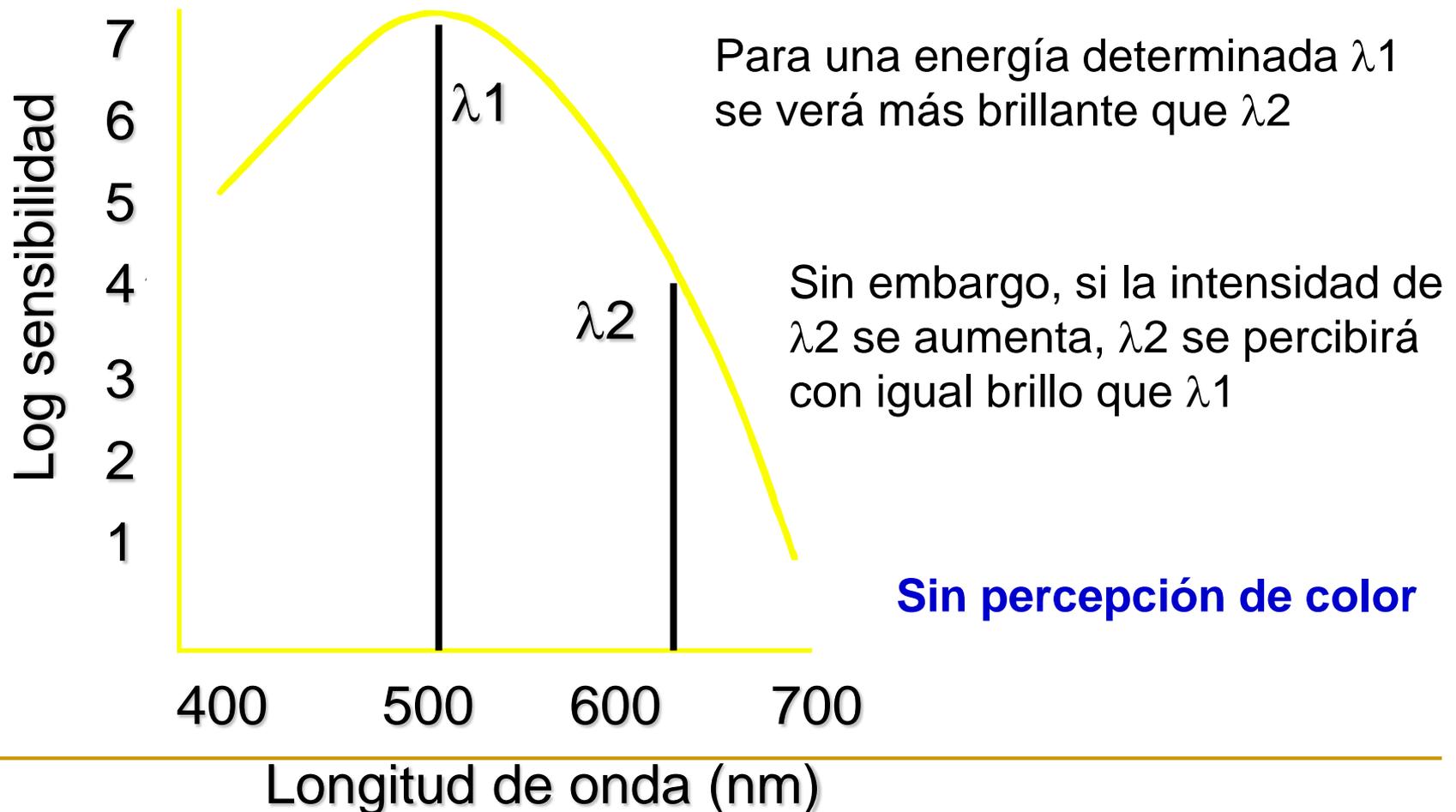
Sensibilidad: inversas de las energías necesarias para una igualación

normalizadas a la unidad

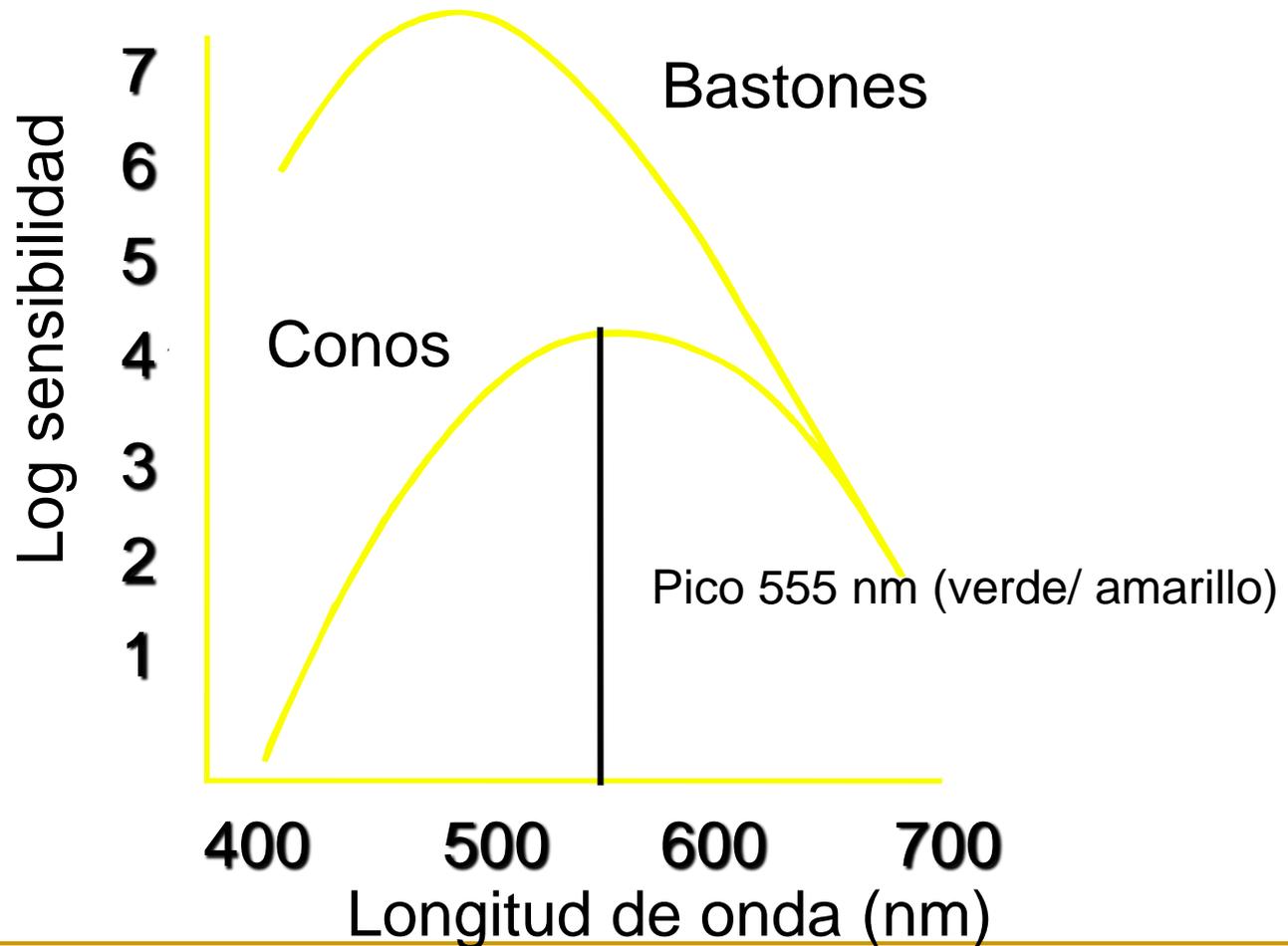
Escala logarítmica



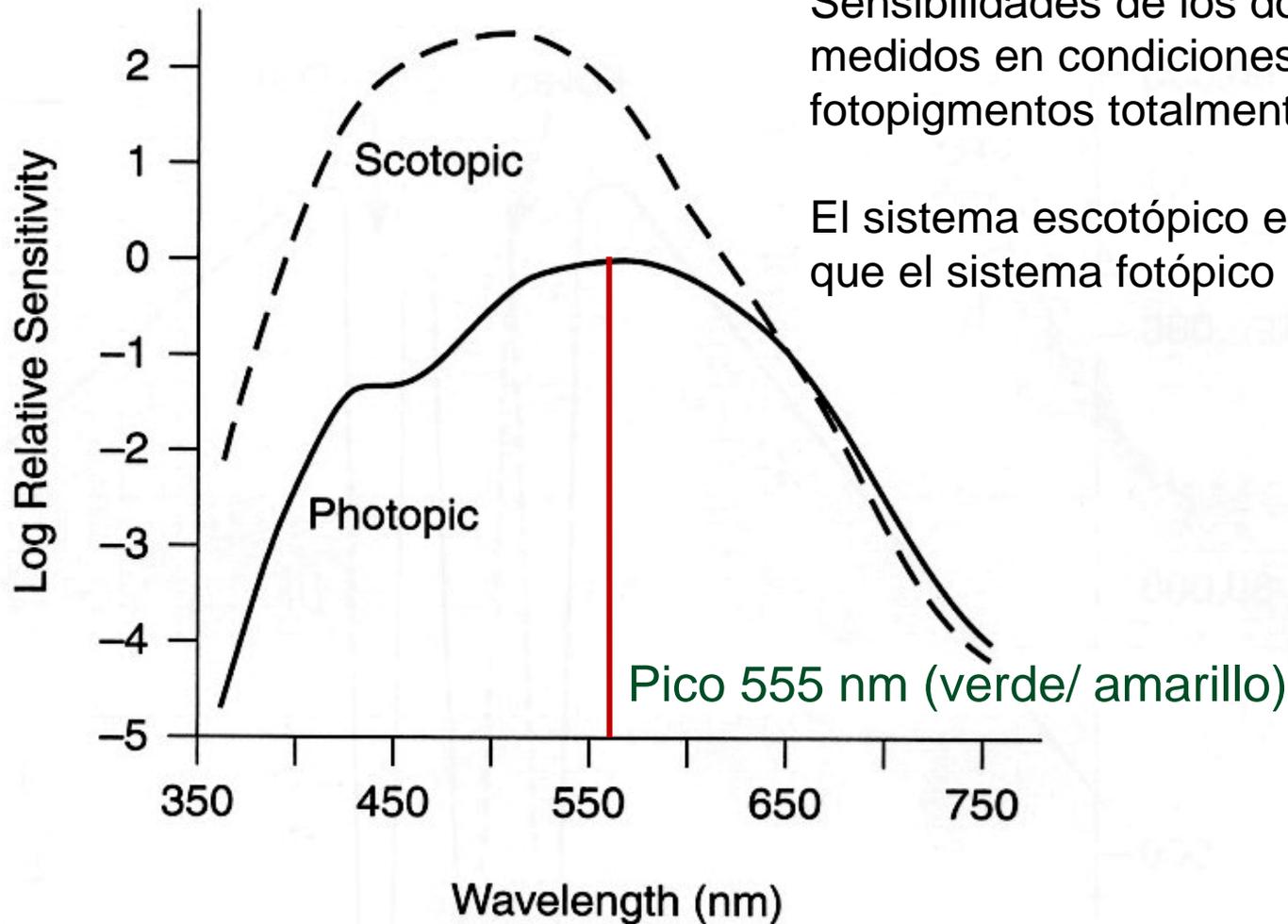
Sensibilidad espectral escotópica



Sensibilidad espectral fotópica



Sensibilidad espectral fotópica y escotópica

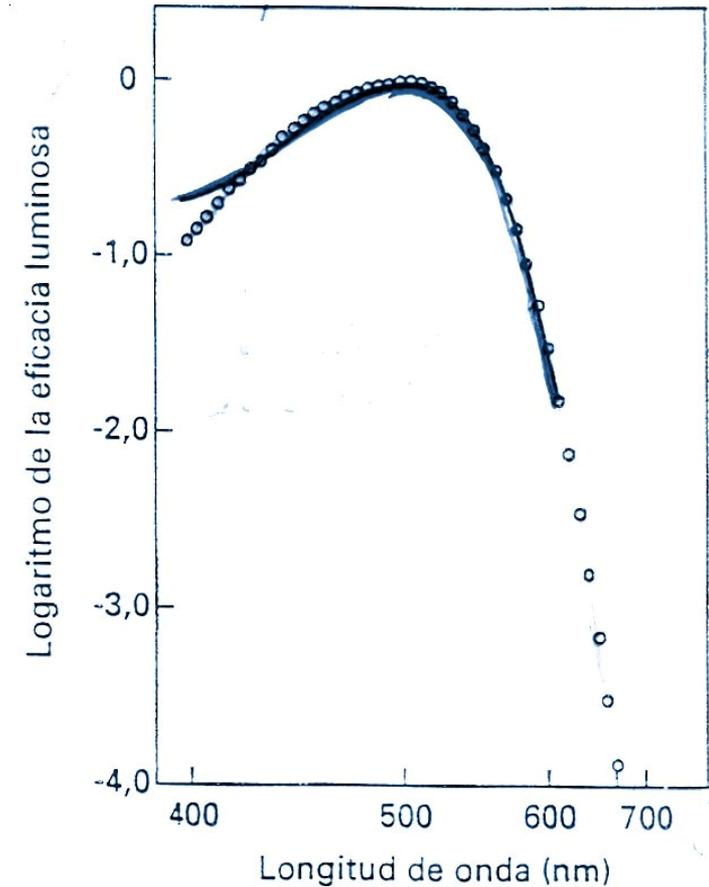
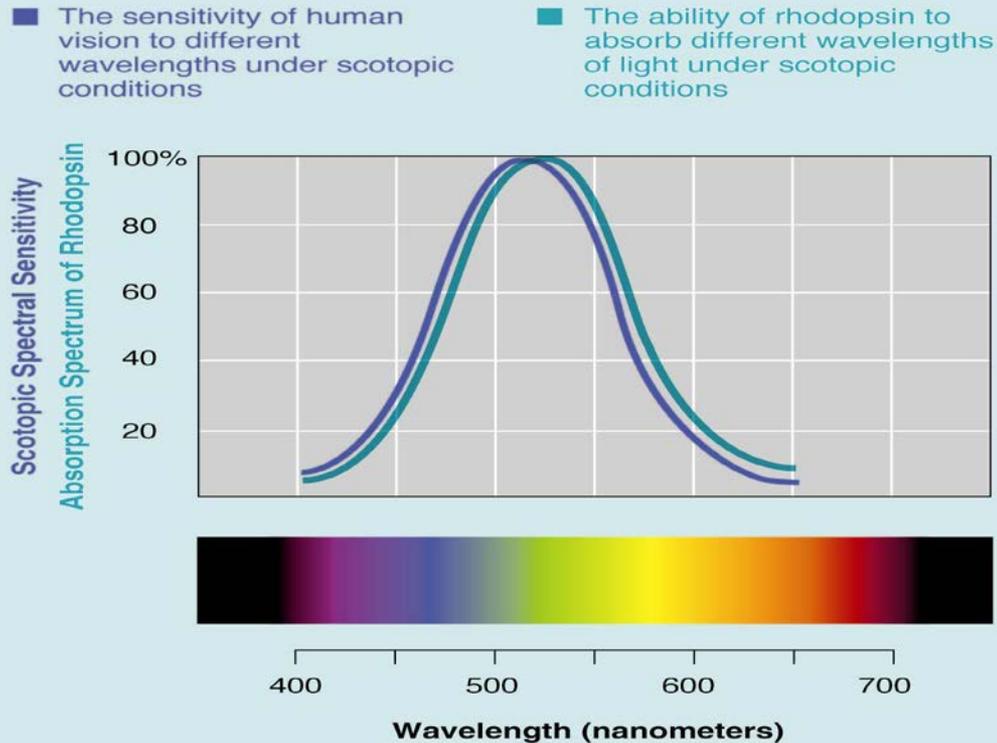


Sensibilidades de los dos sistemas medidos en condiciones de oscuridad con ftopigmentos totalmente regenerados.

El sistema escotópico es más sensible que el sistema fotópico

Relación entre sensibilidad espectral y absorción espectral de fotorreceptores

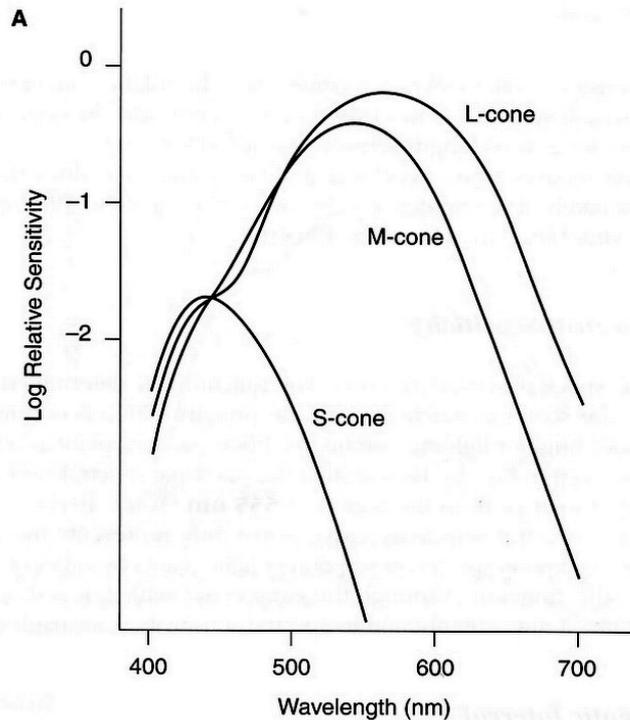
La capacidad de detectar estímulos en condiciones **escotópicas** está determinada por las características de absorción de la **rodopsina**.



Sensibilidad espectral escotópica (o o o)

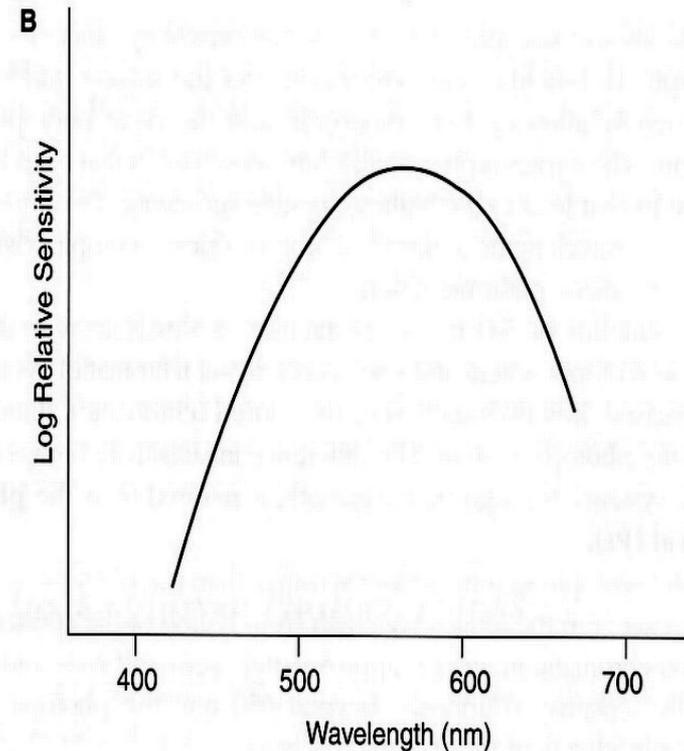
Absorción espectral de rodopsina (—)

Relación entre la sensibilidad espectral fotópica y la absorción espectral de los fotorpigmentos de los conos



Espectros de absorción fotorpigmentos:

- cianolabe (conos S)
- clorolabe (conos M)
- eritrolabe (conos L)

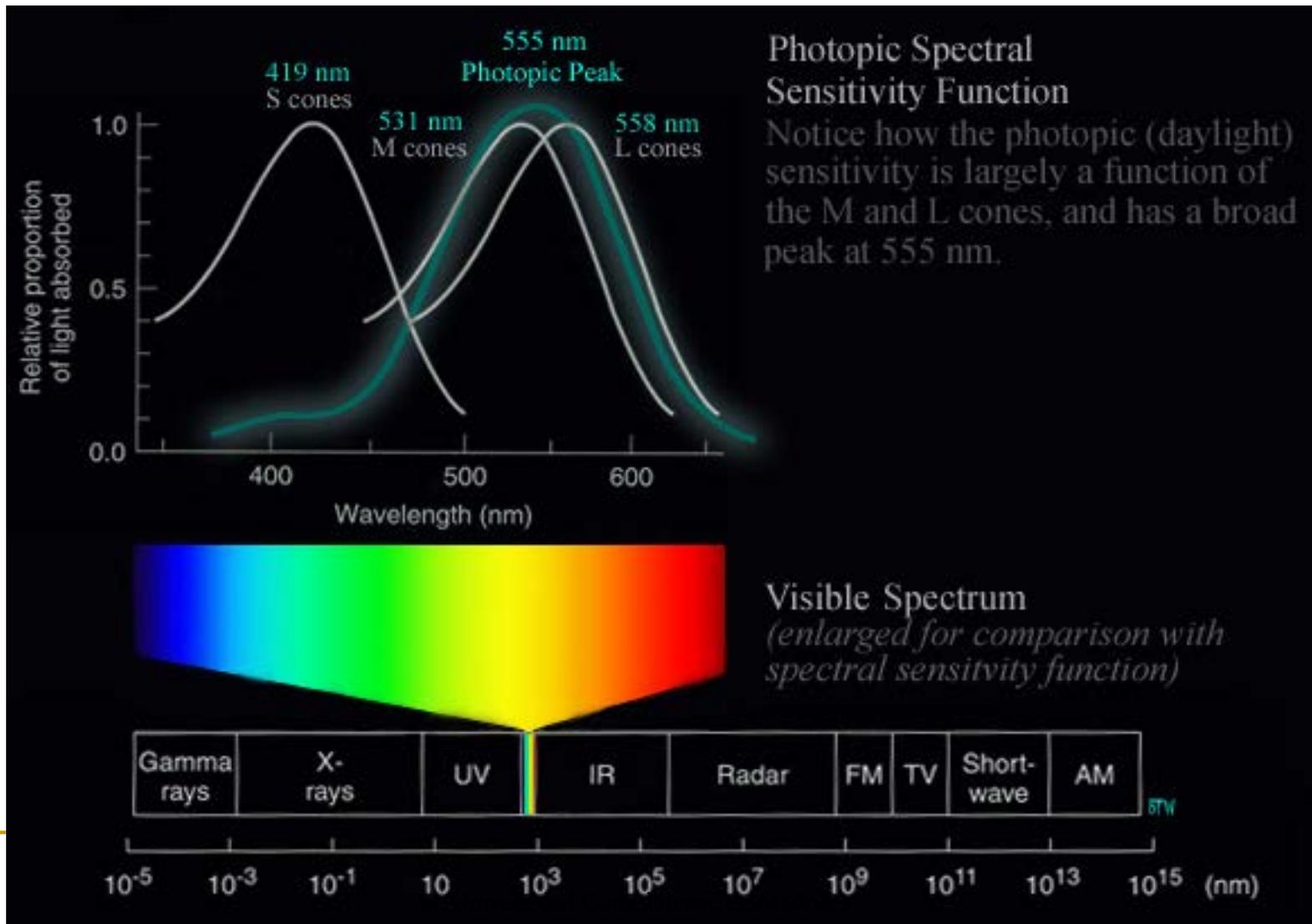


Sensibilidad espectral fotópica:

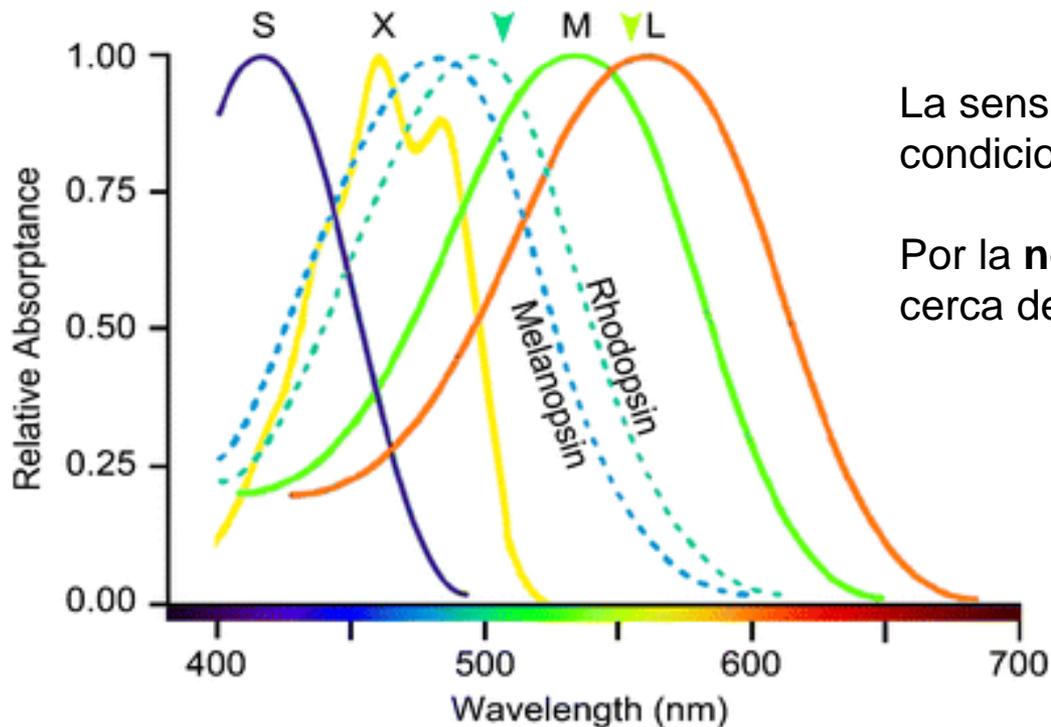
Adición de los espectros de absorción de los **conos M y L**.

Los conos en S contribuyen poco o nada a esta función.

Relación entre la sensibilidad espectral fotópica y la absorción espectral de los fotorreceptores de los conos



Sensibilidad espectral de la visión humana



La sensibilidad espectral máxima en condiciones de **luz diurna** es ~ 555 nm.

Por la **noche**, el pico se desplaza a ~ 507 nm, cerca del pico de la rodopsina (505 nm)

La **melanopsina** en las células ganglionares fotosensibles integra la información de la luz (fotorrecepción circadiana), pero es más sensible a la parte azul del espectro.

Pigmento macular (xantofilas, pico ~ 460 nm).

El 25 - 33% de la luz que entra al ojo se absorbe por gránulos del **pigmento melanina** en el EPR y la coroides. Esto reduce la luz dispersa y protege de las lesiones fóticas.

Efecto Purkinje

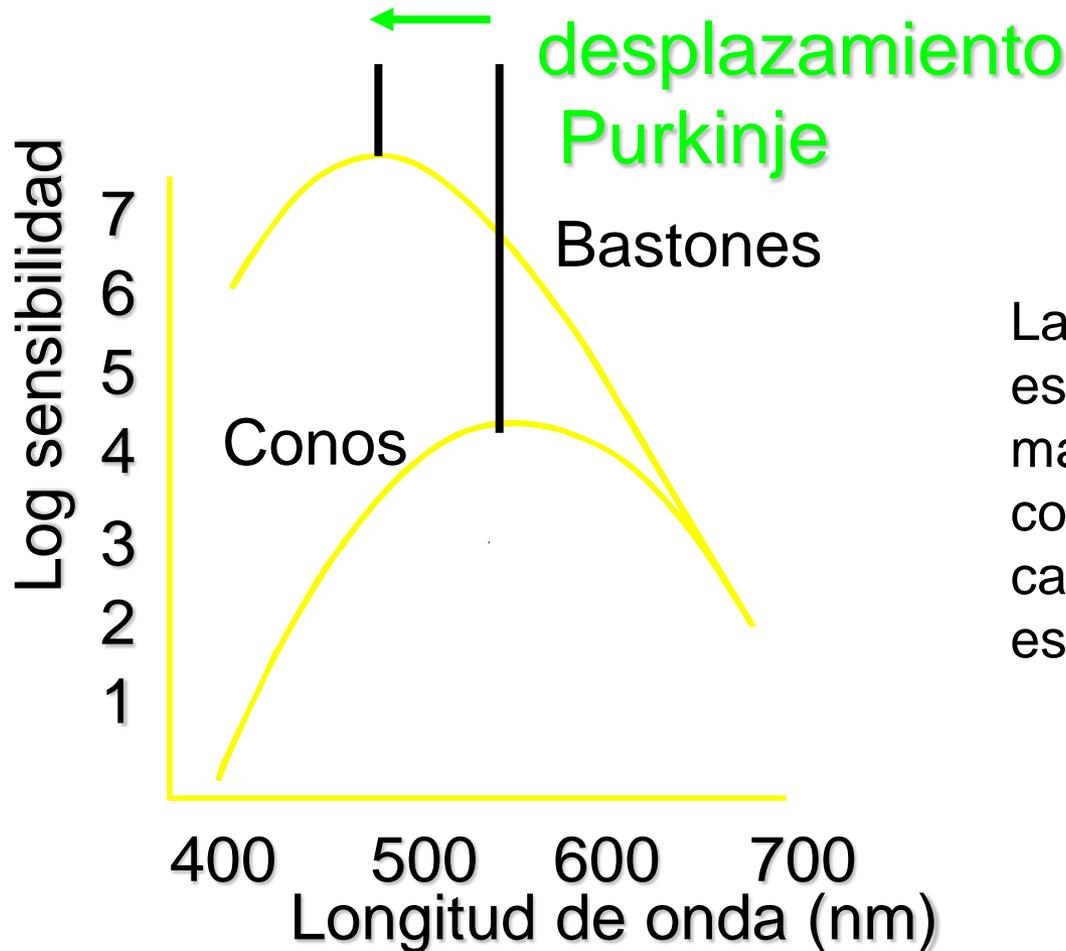


Purkinje notó que las flores amarillas y rojas de su jardín parecían más brillantes que las azules justo antes del atardecer.

Unos minutos después, las flores azules parecían más luminosas.



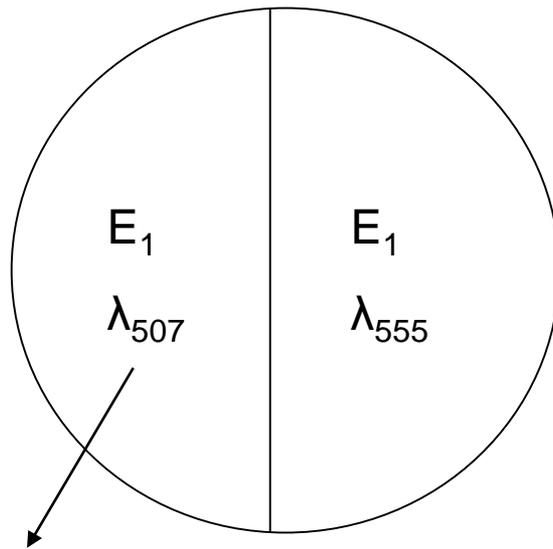
Desplazamiento Purkinje



La luminosidad de los estímulos de longitud de onda más corta aumenta si las condiciones de luminancia cambian desde fotópica a escotópica (y viceversa)

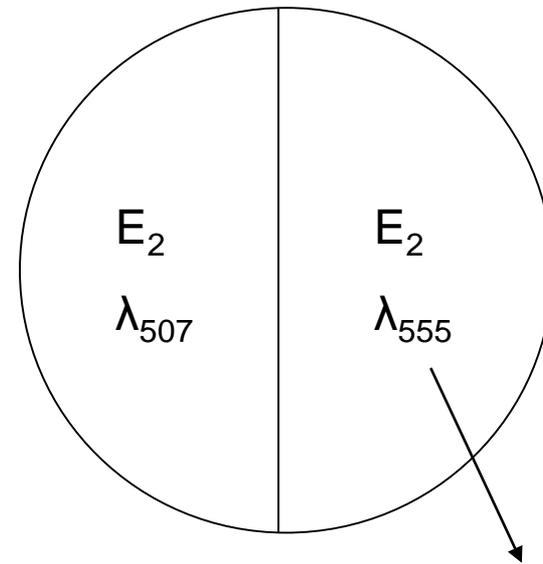
Efecto Purkinje

Estímulos muy tenues que emiten la misma cantidad de fotones.
Detectados por el **sistema escotópico**.



Parece más luminoso

La intensidad de cada estímulo se incrementa en la misma cantidad hasta que los detecta el **sistema fotópico**.



Parece más luminoso

Fotometría y radiometría

- Radiometría
 - Potencia producida por una fuente de radiación, independientemente de su efecto en la visión.
- Fotometría
 - Efecto que esta radiación tiene en el sistema visual.
- La base para las mediciones fotométricas es la curva de eficiencia luminosa fotópica (V_λ)
- El observador de referencia fotométrico permite definir las magnitudes **fotométricas** a partir de las **radiométricas**

Fotometría y radiometría

La eficacia visual de una fuente que emite una radiación monocromática de **radiancia** L_e , se expresa por su equivalente fotométrico, la **luminancia**, L .

La **luminancia** expresa la luminosidad visual que genera la radiancia L_e , a través de su valor en la curva de eficiencia luminosa

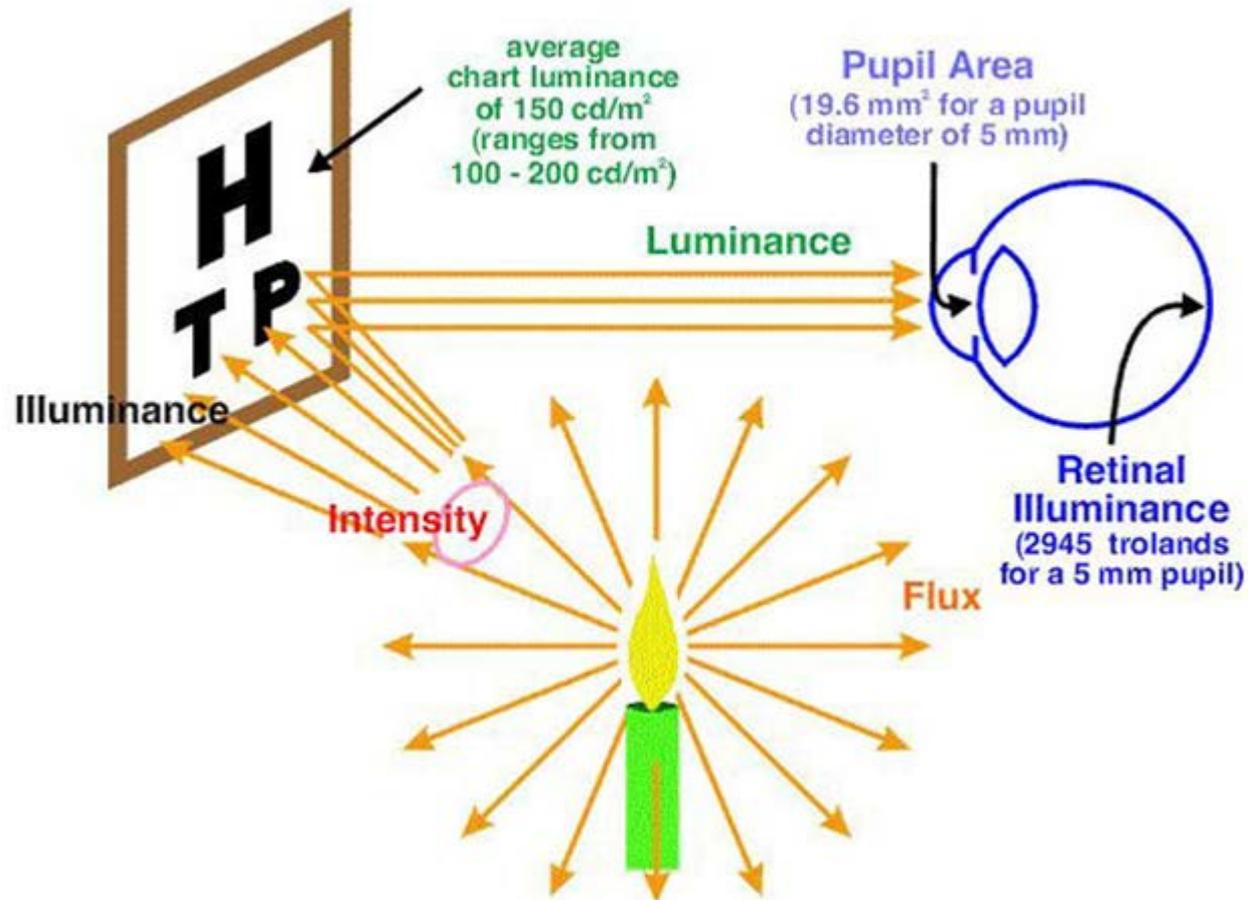
La luminancia se define por la expresión:

$$L = K_m \cdot V_\lambda \cdot L_e$$

K_m = coeficiente constante (683 lm / w)

$L_e = w / sr \cdot m^2$ $L = lm / sr \cdot m^2 = cd/m^2$

Magnitudes fotométricas fundamentales



Magnitudes fotométricas fundamentales

Flujo luminoso (F)

Intensidad luminosa (I)

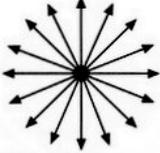
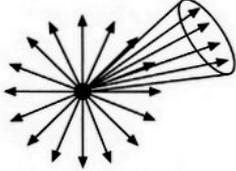
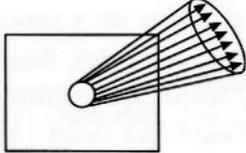
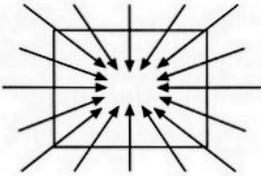
$$I = \frac{F}{\Omega}$$

Luminancia (L)

$$L = \frac{I}{S}$$

Iluminancia (E)

$$E = \frac{F}{S}$$

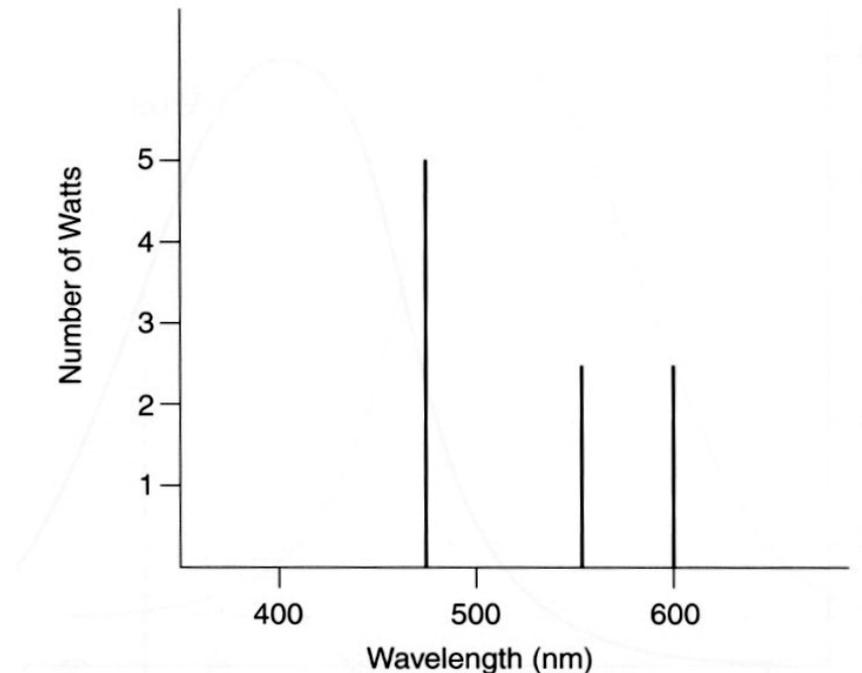
	Definition	Common Units	Radiometric Equivalent and Units
Luminous Power 	Total light power produced by a source en todas direcciones	Lumens	Radiant power (joules/second or watts)
Luminous Intensity 	Light power produced in a solid angle by a point source dirección determinada	Lumens/steradian Candelas (1 lumen/steradian = 1 candela)	Radiant intensity (watts/steradian)
Luminance 	Luminous intensity per unit projected area of an extended source	Candelas/square meter Foot-lamberts	Radiance (watts/steradian/square meter)
illuminance 	Luminous power falling on a surface	Lumens/square meter Lumens/square foot	Irradiance (watts/square meter)

$$E = I \times \cos \alpha / d^2$$

Flujo luminoso (F)

Ejemplo: distribución espectral de un estímulo compuesto de tres λ

El flujo o potencia luminosa se determina calculando el número de lúmenes producidos por cada λ y luego sumando estos valores.



Flujo radiante

5 W de 475 nm

2,5 W de 555 nm

2,5 W de 600 nm

Flujo luminoso

$0,1 \cdot 680 \text{ lumen/watio} \cdot 5 \text{ W} = 340 \text{ lúmenes}$

$1,0 \cdot 680 \text{ lumen/watio} \cdot 2,5 \text{ W} = 1700 \text{ lúmenes}$

$0,62 \cdot 680 \text{ lumen/watio} \cdot 2,5 \text{ W} = 1054 \text{ lúmenes}$

Nº total de lúmenes = 3094 lúmenes

El sistema fotométrico es aditivo: [ley de la aditividad de Abney](#)

Fotometría y radiometría

La **luminancia total** de una radiación compuesta o de un espectro continuo es la suma de las luminancias componentes (Ley de Abney):

$$L = K_m \int_{380}^{760} V_{\lambda} L_{e\lambda} d\lambda$$

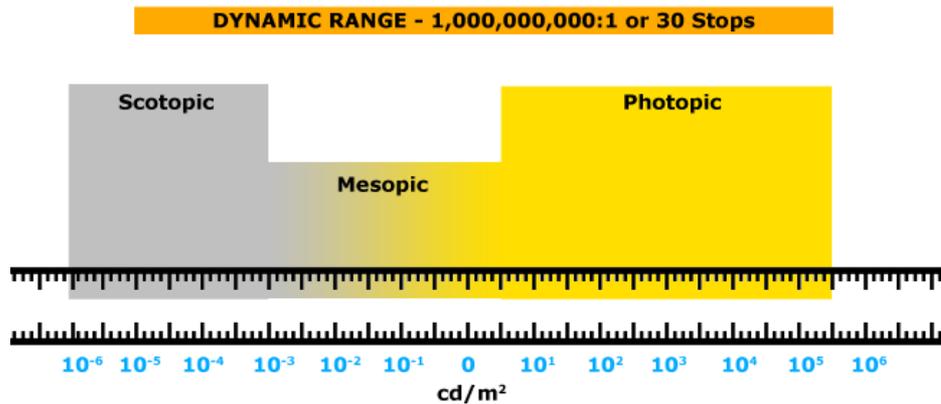
Las otras magnitudes fotométricas se definen a partir de sus magnitudes radiométricas:

$$X = K_m \int_{380}^{760} V_{\lambda} X_{e\lambda} d\lambda$$

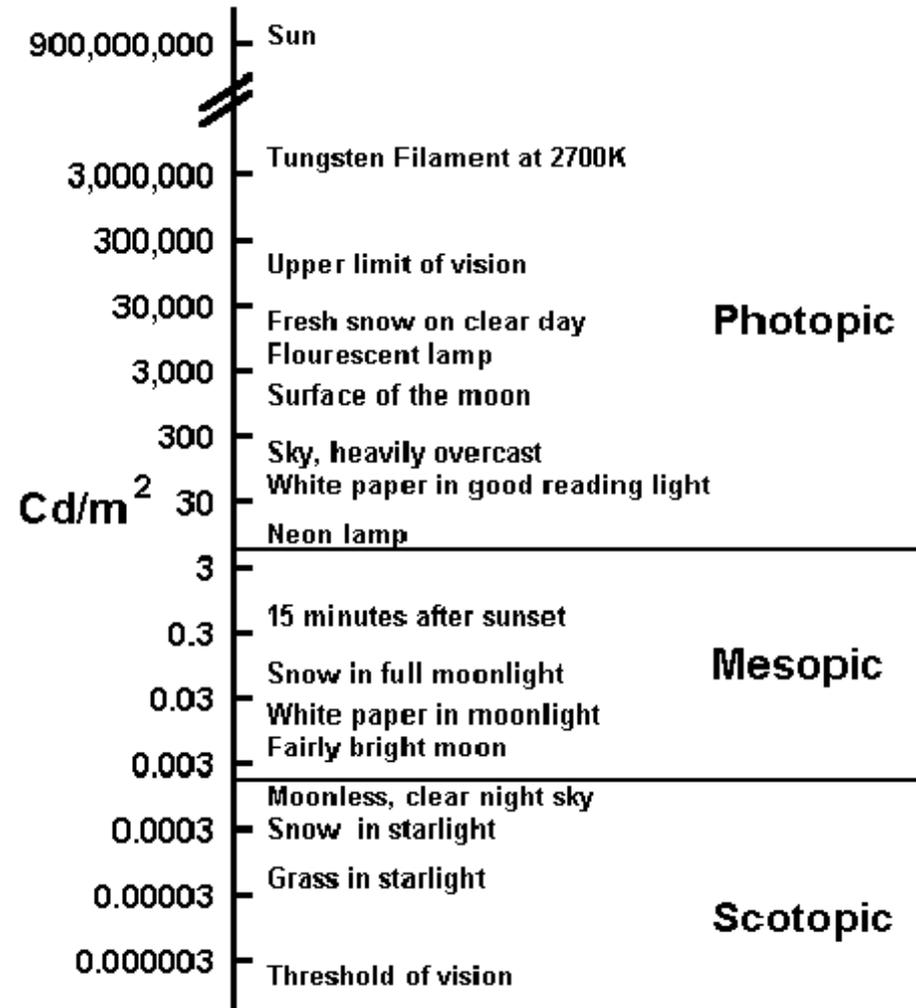
X = magnitud luminosa

X_{eλ} = magnitud radiométrica espectral correspondiente

Niveles de luminancia (cd/m^2) a los cuales puede estar sometido el ojo



Copyright © Sareesh Sudhakaran 2012



Illuminancia retiniana

La luz que alcanza la retina de un ojo con una pupila grande es mayor que en el caso de un ojo con una pupila pequeña.

La iluminación de la retina tiene en cuenta el área de la pupila

$$E_r = L \cdot S_p$$

E_r = Iluminancia retiniana en trolands

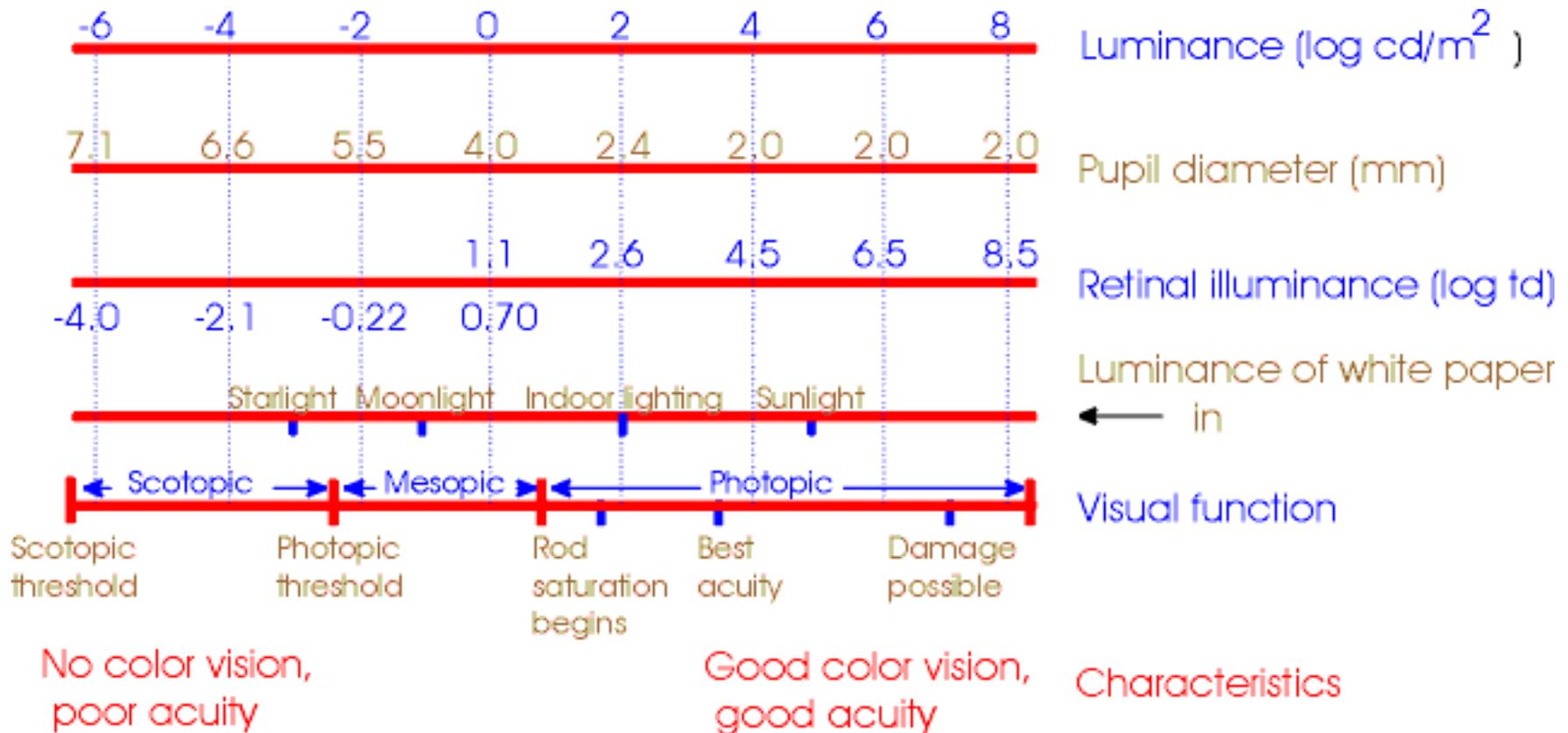
L = Luminancia de la fuente luminosa observada cd/m^2

S_p = Superficie pupilar en mm^2

Unidad: **troland (td)** es la iluminancia de la retina producida por un campo de luminancia de 1 cd/m^2 observado con una pupila de 1 mm^2 de superficie.

Si la iluminación de la retina en un experimento se especifica como un número dado de trolands, la cantidad de luz en todas las retinas será la misma independientemente del diámetro de la pupila.

Iuminancia retiniana



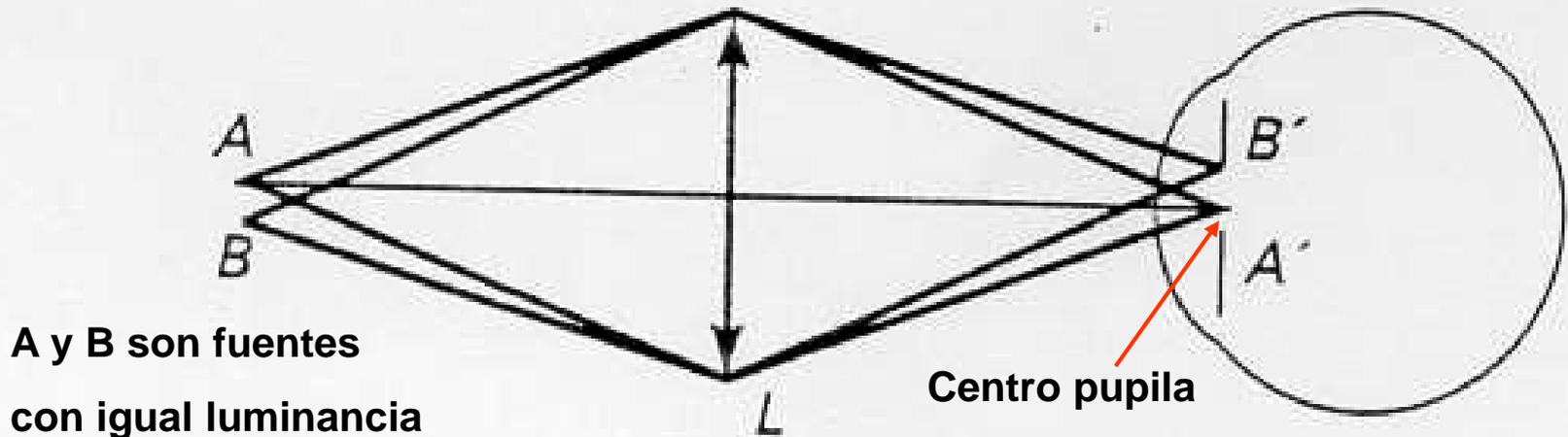
No color vision,
poor acuity

Good color vision,
good acuity

Characteristics

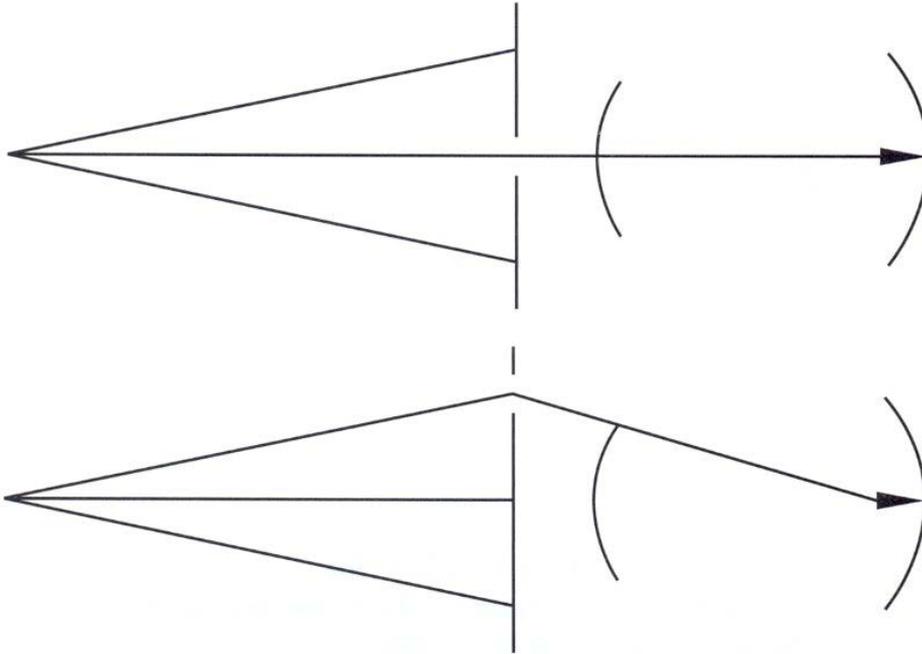
Adapted from Hood & Finkelstein (1986)

Efecto Stiles-Crawford



La probabilidad de que la luz sea absorbida por el fotorreceptor es mayor para la luz que entra por el **centro de la pupila** que para la luz que entra por la **periferia**.

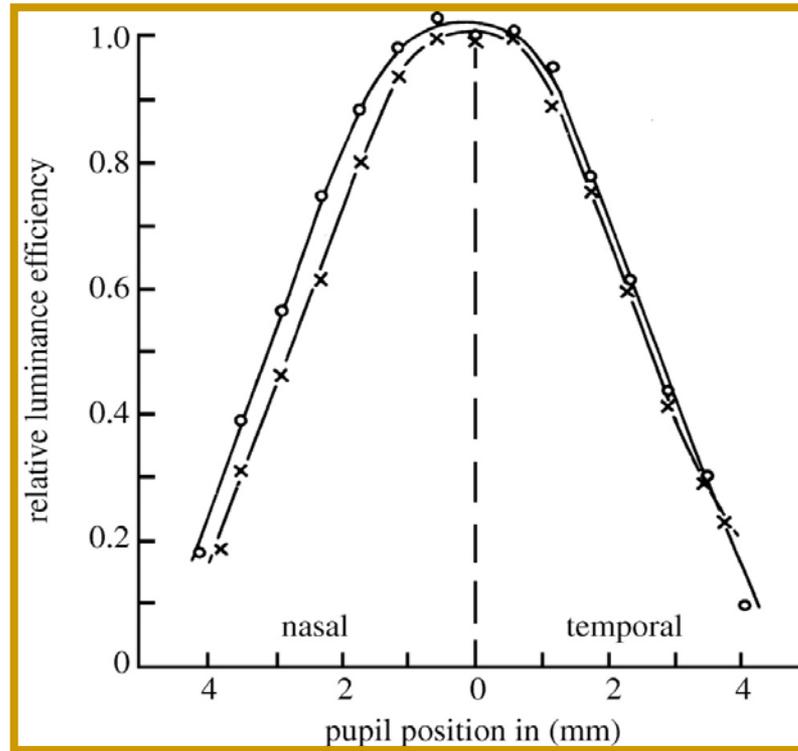
Efecto Stiles-Crawford



Los rayos de luz inciden perpendiculares a la superficie de los conos y producen una imagen más luminosa.

Los rayos de luz inciden oblicuos a la superficie de los conos y son menos eficientes.

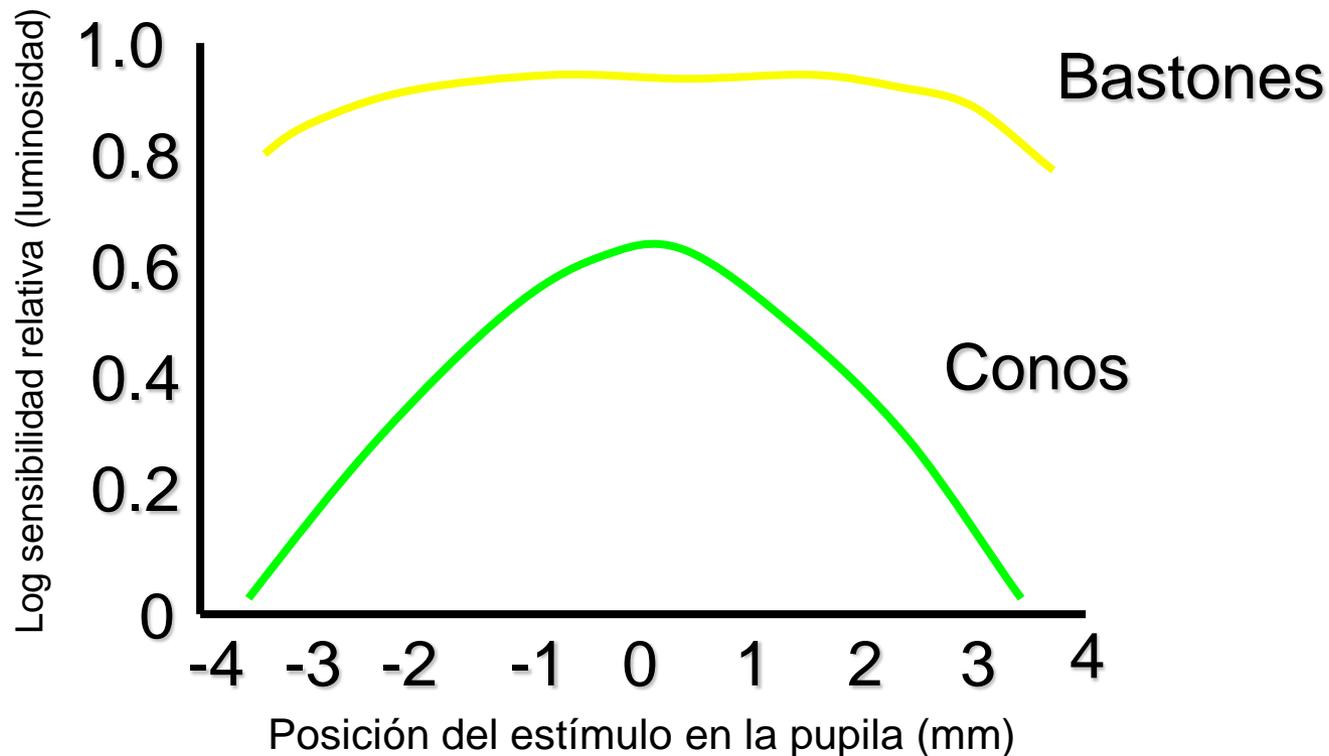
Efecto Stiles-Crawford: selectividad direccional a la luz



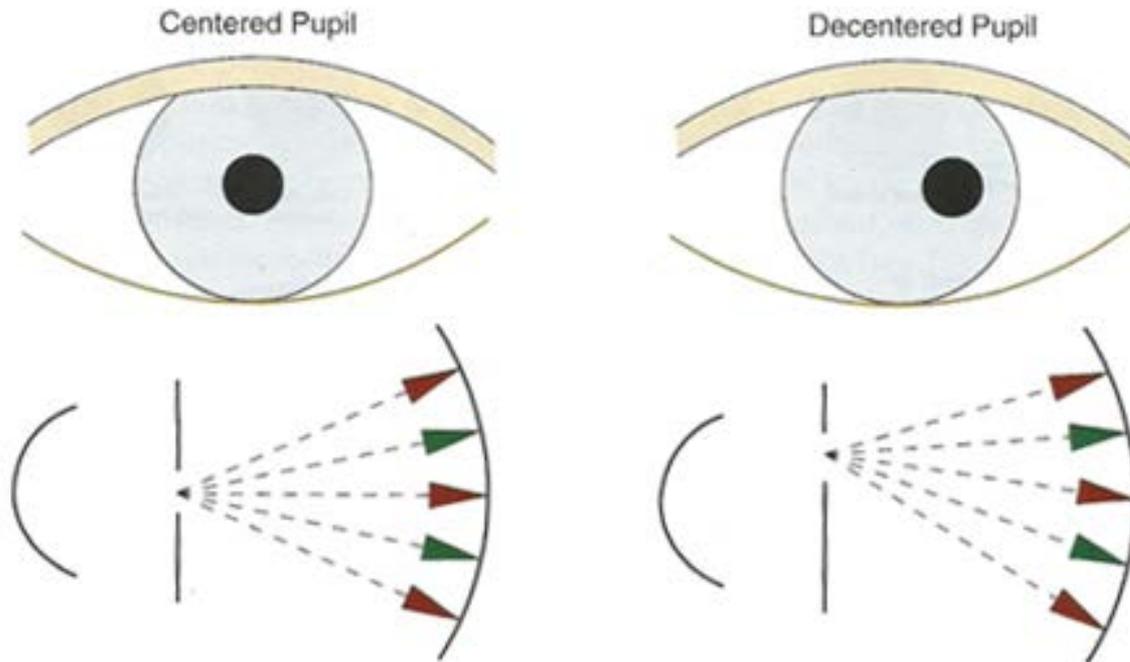
Eficacia luminosa relativa de los rayos de luz según su punto de entrada en la pupila en visión foveal y fotópica

Efecto Stiles-Crawford

En **condiciones escotópicas**, el ángulo con el cual los rayos de luz inciden en los **bastones** no afecta a la sensibilidad luminosa (**no hay sensibilidad direccional**)



Efecto Stiles-Crawford



Ojo adaptado con LC que tiene una pupila descentrada.

Los conos apuntan hacia el centro de la pupila, maximizando su efectividad.

Los conos apuntan hacia la pupila descentrada, maximizando su efectividad.

Los conos son móviles y se orientan a la luz.

Efecto Stiles-Crawford

Los conos actúan como guía de ondas

Cuando el rayo de luz entra ortogonal la efectividad para blanquear los fotorreceptores es máxima y aumenta el brillo percibido.

