

Descripción teórico-experimental del efecto de inducción cromática

Defensa de Tesis de Maestría

Tadeo N. Segovia

Directora: Inés Samengo

Colaborador: Nicolás Vattuone

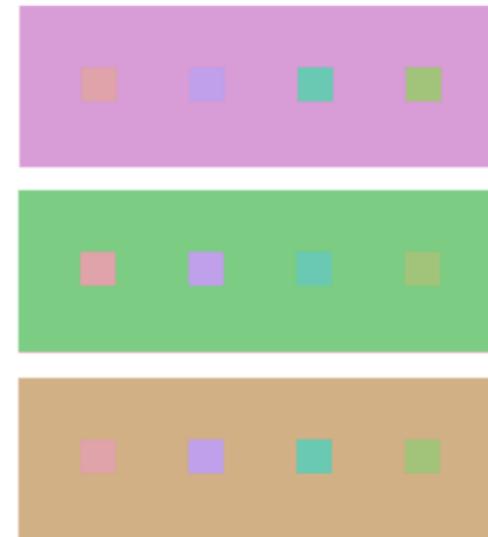
Jurado:

M. Onetto, E. Kropff, G. Rozas

Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo
Departamento de Física Médica, Centro Atómico Bariloche

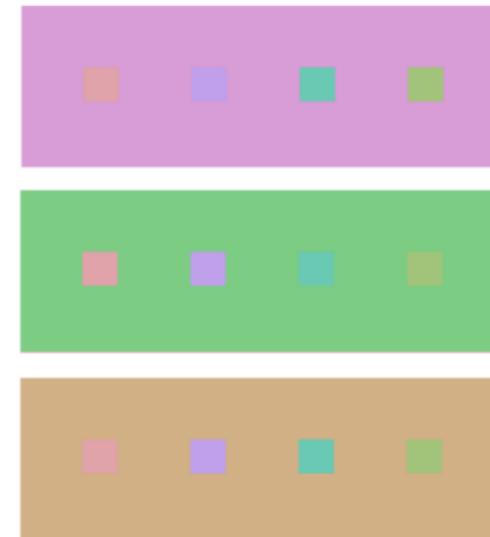
Inducción cromática

- Cambio en el color de un dado estímulo originado por la cromaticidad de su entorno.



Inducción cromática

- Cambio en el color de un dado estímulo originado por la cromaticidad de su entorno.
- El efecto es repulsivo, el cambio intensifica el contraste entre el color del estímulo y su entorno.



Objetivos

- **Desarrollamos una descripción teórica del proceso de inducción cromática que contiene parámetros anatómicos y fisiológicos de las redes neuronales subyacentes.**



Objetivos

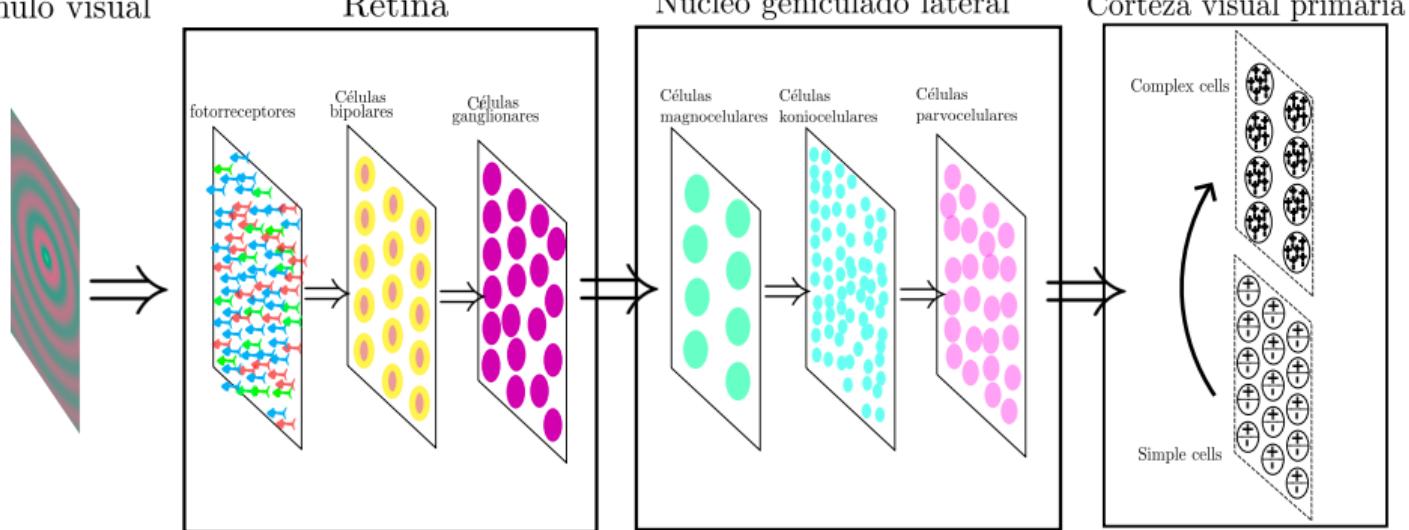
- **Desarrollamos una descripción teórica del proceso de inducción cromática que contiene parámetros anatómicos y fisiológicos de las redes neuronales subyacentes.**
- **Diseñamos y llevamos a cabo experimentos comportamentales en una población de voluntarios que permiten acceder a estos parámetros.**



Introducción

Pathway visual

Estímulo visual



Introducción

Pathway visual

- La información transmitida por las células ganglionares codifica la composición lumínica y cromática de un cierto área del campo visual.



Introducción

Pathway visual

- La información transmitida por las células ganglionares codifica la composición lumínica y cromática de un cierto área del campo visual.
- Esto se debe, entre otras cosas, a las conexiones laterales causadas por las células horizontales y amácrinas, y a la convergencia que se observa en la transmisión feedforward fotorreceptores → bipolares → ganglionares.



Introducción

Pathway visual

- La información transmitida por las células ganglionares codifica la composición lumínica y cromática de un cierto área del campo visual.
 - Esto se debe, entre otras cosas, a las conexiones laterales causadas por las células horizontales y amácrinas, y a la convergencia que se observa en la transmisión feedforward fotorreceptores → bipolares → ganglionares.
 - Son estas conexiones las que vuelven a la percepción del estímulo dependiente de su entorno.

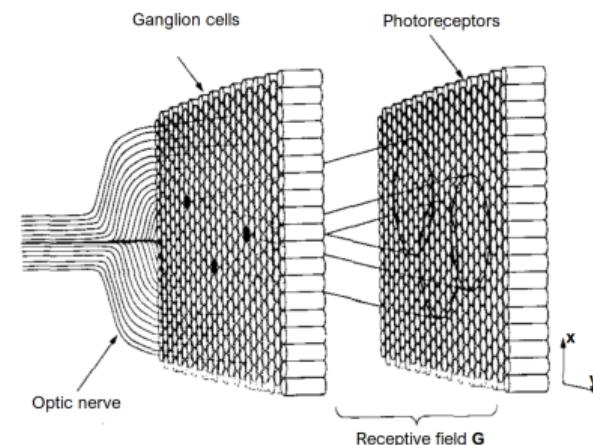


Introducción

Campos receptivos

El procesamiento de información visual en la retina puede ser modelado como un filtro lineal **G** conocido como *campo receptivo*.

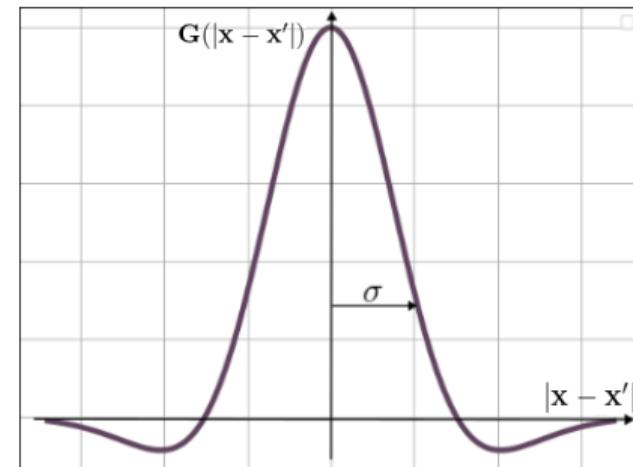
$$O(\mathbf{x}) = \int d\mathbf{x}' \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') L(\mathbf{x}')$$



Introducción

Estructura center-surround

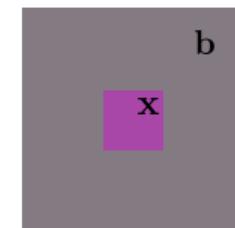
Los campos receptivos de las células de la retina suelen tener estructura *center-surround*. Es decir, las neuronas de la primera capa ubicadas en \mathbf{x}' cercanos a la neurona de la segunda capa ubicada en \mathbf{x} la afectan positivamente y aquellas ubicadas en \mathbf{x}' lejanas la afectan negativamente (o viceversa).



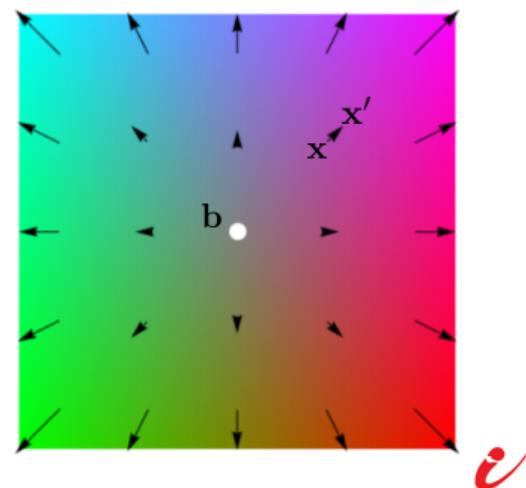
Introducción

Coordenadas perceptuales

- En un trabajo anterior¹ se describió el efecto de inducción cromática como un desplazamiento en el espacio de colores.



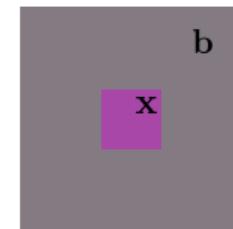
$$x \xrightarrow{\Phi_b} x'$$



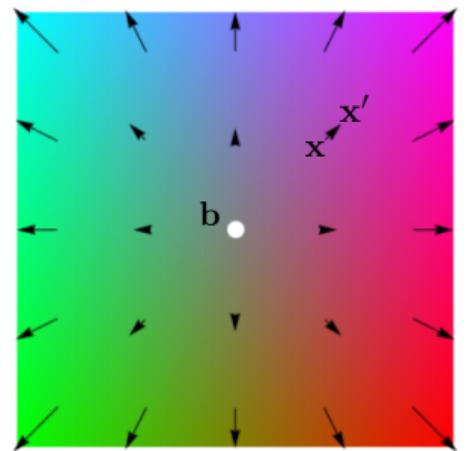
Introducción

Coordenadas perceptuales

- En un trabajo anterior¹ se describió el efecto de inducción cromática como un desplazamiento en el espacio de colores.
- Se demostró que existe un sistema de coordenadas donde este efecto es isotrópico y homogéneo.



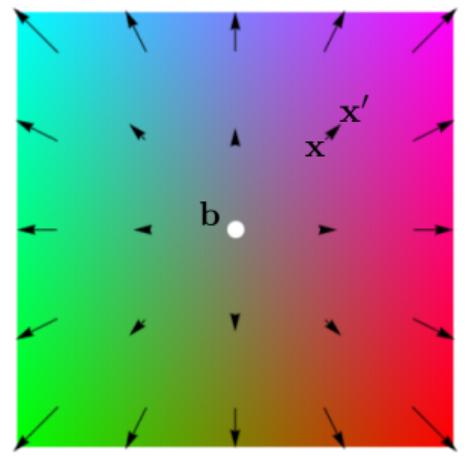
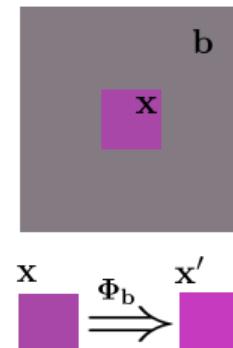
$$x \xrightarrow{\Phi_b} x'$$



Introducción

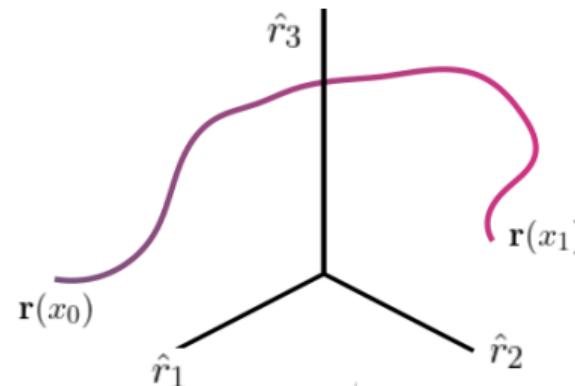
Coordenadas perceptuales

- En un trabajo anterior¹ se describió el efecto de inducción cromática como un desplazamiento en el espacio de colores.
- Se demostró que existe un sistema de coordenadas donde este efecto es isotrópico y homogéneo.
- Llamamos a este sistema de coordenadas como *coordenadas perceptuales*.



Trabajo previo

El color de un estímulo en la posición x está representada por $\mathbf{r}(x)$, sus coordenadas en el espacio de colores.



Trabajo previo

El efecto del campo receptivo sobre el estímulo cromático

El color percibido $\tilde{r}(\mathbf{x})$ es una versión filtrada del estímulo físico $r(\mathbf{x})$, producto de un campo receptivo cromático \mathbf{G} .

$$\tilde{r}(\mathbf{x}) = \int d\mathbf{x}' \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') r(\mathbf{x}')$$

\mathbf{x} ⇒ Coordenadas espaciales

\mathbf{r} ⇒ Coordenadas perceptuales de la cromaticidad estímulo.

$\tilde{\mathbf{r}}$ ⇒ Coordenadas perceptuales del color del estímulo.



Desarrollo teórico

El efecto del campo receptivo sobre el estímulo cromático

Utilizando la invarianza translacional de los campos receptivos convolucionales

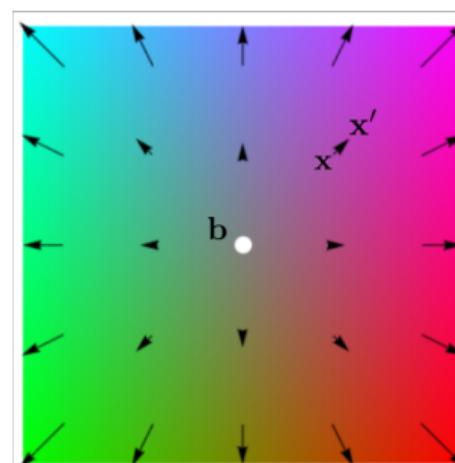
$$\tilde{r}(\mathbf{x}) = \int d\mathbf{x}' \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') r(\mathbf{x}') \Rightarrow \tilde{r}(\mathbf{x}) = \int d\mathbf{x}' \mathbf{G}(\mathbf{x} - \mathbf{x}') r(\mathbf{x}')$$



Trabajo previo

En las coordenadas perceptuales, la inducción cromática tiene simetría rotacional, es decir, si \vec{r} es transformado por una rotación arbitraria \mathcal{R} , entonces \vec{r}' debe transformar de la misma manera. por lo tanto \mathbf{G} debe ser una matriz escalar

$$\mathbf{G}(\mathbf{x} - \mathbf{x}') = G(\mathbf{x} - \mathbf{x}') \mathbf{I}_3$$

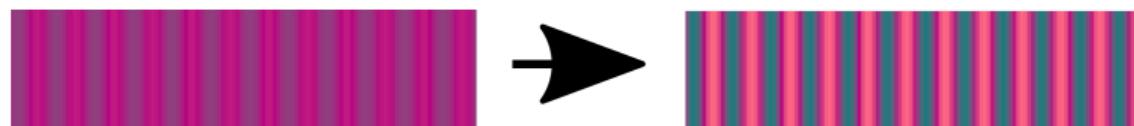


Trabajo previo

Input sinusoidal unidimensional

Si presentamos el estímulo $\mathbf{r}(x)$, obtenemos el color $\tilde{\mathbf{r}}(x)$

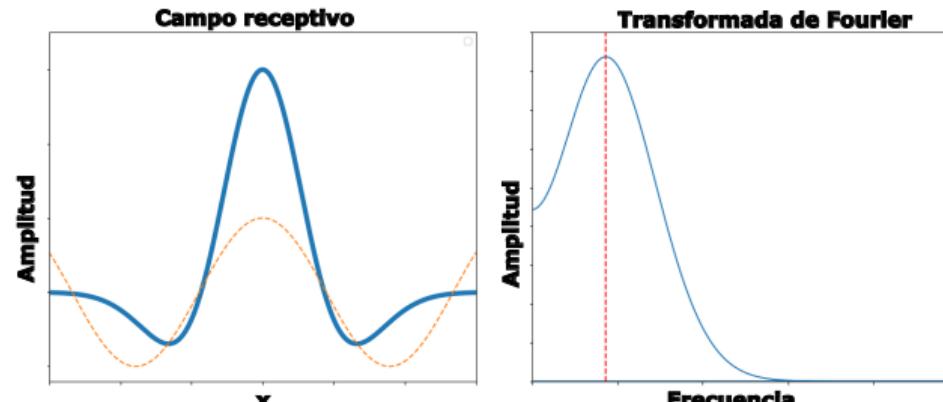
$$\mathbf{r} = \frac{\mathbf{r}_0 + \mathbf{r}_1}{2} + \frac{\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_1}{2} \cos(kx) \xrightarrow{\mathbf{G}} \tilde{\mathbf{r}} = \frac{\mathbf{r}_0 + \mathbf{r}_1}{2} + \frac{\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}_1}{2} \cos(kx) \mathcal{F}[\mathbf{G}](k)$$



Trabajo previo

Input sinusoidal unidimensional

- La discriminación es óptima cuando la amplitud de la modulación es máxima, es decir, cuando $\mathcal{F}[\mathbf{G}](k)$ es máxima.
- La distancia característica σ de \mathbf{G} está relacionada con la frecuencia espacial k donde $\mathcal{F}[\mathbf{G}](k)$ alcanza su máximo.



Desarrollo teórico

Caso bidimensional

Estamos interesados en encontrar una versión bidimensional del estímulo previo, que nos pueda servir para campos receptivos radialmente simétricos.



Desarrollo teórico

Caso bidimensional

Estamos interesados en encontrar una versión bidimensional del estímulo previo, que nos pueda servir para campos receptivos radialmente simétricos. La transformada de Hankel de orden cero está definida como

$$\mathcal{H}[f](k) = \int_0^{\infty} f(r) J_0(kr) r dr$$



Desarrollo teórico

Caso bidimensional

Estamos interesados en encontrar una versión bidimensional del estímulo previo, que nos pueda servir para campos receptivos radialmente simétricos. La transformada de Hankel de orden cero está definida como

$$\mathcal{H}[f](k) = \int_0^{\infty} f(r) J_0(kr) r dr$$

Para una función radial $f(x, y)$, $\mathcal{H}[f](k)$ y $\mathcal{F}[f](u, v)$ están relacionadas por

$$\mathcal{F}_{x,y}[f](u, v) = 2\pi \mathcal{H}[f](k), \text{ con } k = 2\pi \sqrt{u^2 + v^2}$$



Desarrollo teórico

Teorema de la convolución

Usando la relación entre $\mathcal{H}[f](k)$ y $\mathcal{F}[f](u, v)$, podemos obtener una expresión similar al teorema de la convolución para $\mathcal{H}[f](k)$

$$\mathcal{H}[f * g](k) = \mathcal{H}[f](k) \mathcal{H}[g](k)$$

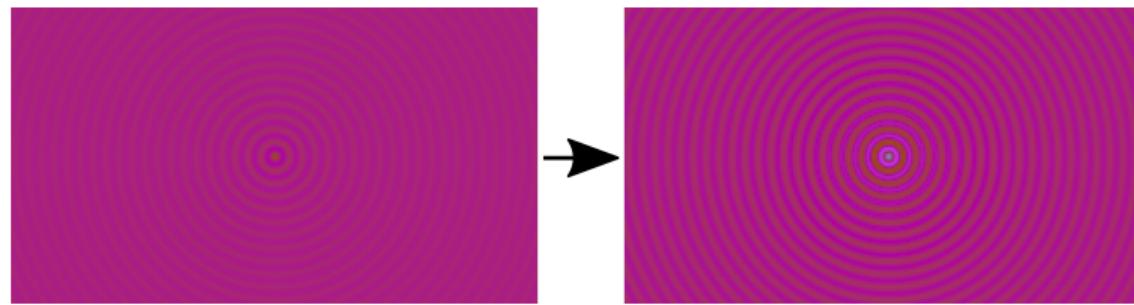


Desarrollo teórico

Utilizando la función J_0 de Bessel como estímulo

Si presentamos el estímulo $\mathbf{r}(x, y)$, obtenemos el color percibido $\tilde{\mathbf{r}}$

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \sqrt{k} \epsilon J_0(k\rho) \xrightarrow{\mathbf{G}} \tilde{\mathbf{r}} = \mathbf{r}_0 + \sqrt{k} \mathcal{H}[\mathbf{G}](k) \epsilon J_0(k\rho)$$



Umbral de discriminación y la distancia característica del campo receptivo

- El umbral de discriminación h está relacionado a la amplitud mínima ϵ que necesita un estímulo para ser percibido.
- Para nuestro estímulo, este umbral está inversamente relacionado a la amplitud percibida $\mathcal{H}[\mathbf{G}](k)$.
- $h(k)$ alcanza su mínimo en la frecuencia espacial k donde $\mathcal{H}[\mathbf{G}](k)$ alcanza su máximo.



Umbral de discriminación y la distancia característica del campo receptivo

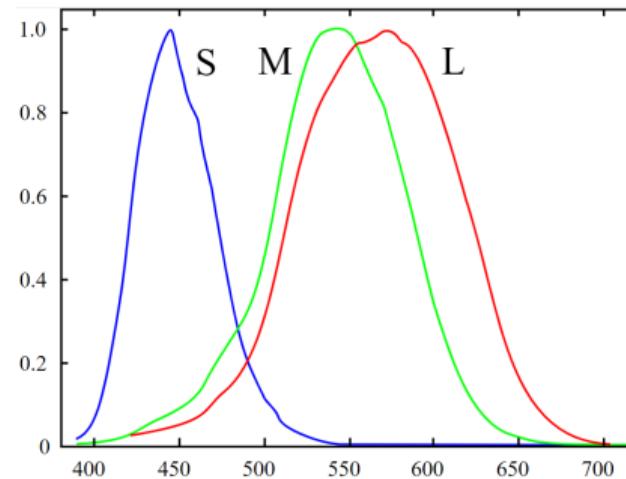
- El umbral de discriminación h está relacionado a la amplitud mínima ϵ que necesita un estímulo para ser percibido.
- Para nuestro estímulo, este umbral está inversamente relacionado a la amplitud percibida $\mathcal{H}[\mathbf{G}](k)$.
- $h(k)$ alcanza su mínimo en la frecuencia espacial k donde $\mathcal{H}[\mathbf{G}](k)$ alcanza su máximo.

Podemos diseñar experimentos de discriminación que nos permitan acceder al umbral de discriminación $h(k)$ para distintas frecuencias.

Experimentos de discriminación

Coordenadas LMS

- Cada coordenada está asociada con la señal absorbida por cada tipo de cono en la retina.
- Combinaciones lineales de estas coordenadas están asociadas a propiedades cromáticas (**L - M** y **S**) y lumínicas de los estímulos (**L + M**).
- Son reproducibles a diferencia de las coordenadas **RGB**.



Experimentos de discriminación

Calibración

Realizamos una calibración de la pantalla para realizar los experimentos de manera tal de obtener una transformación $\{\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B}\} \Rightarrow \{\mathbf{S}, \mathbf{M}, \mathbf{L}\}$, a través de

$$C = \int_{-\infty}^{\infty} d\lambda E_{R,G,B}(\lambda) \alpha_C(\lambda) \text{ con } C \in \{\mathbf{S}, \mathbf{M}, \mathbf{L}\}$$

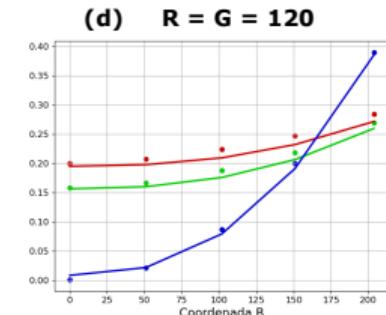
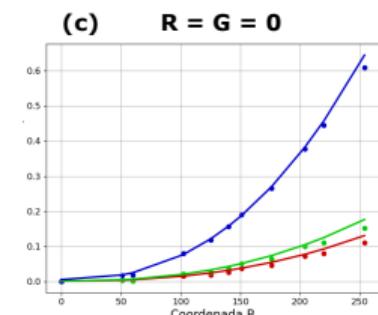
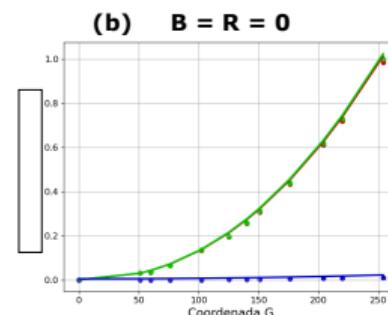
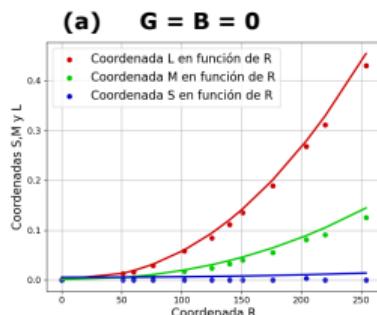
y un ajuste del tipo

$$\begin{pmatrix} \mathbf{S} \\ \mathbf{M} \\ \mathbf{L} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{SR} & \alpha_{SG} & \alpha_{SB} \\ \alpha_{MR} & \alpha_{MG} & \alpha_{MB} \\ \alpha_{LR} & \alpha_{LG} & \alpha_{LB} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{R}^{\gamma_r} \\ \mathbf{G}^{\gamma_g} \\ \mathbf{B}^{\gamma_b} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_S \\ a_M \\ a_L \end{pmatrix},$$



Experimentos de discriminación

Resultados del ajuste



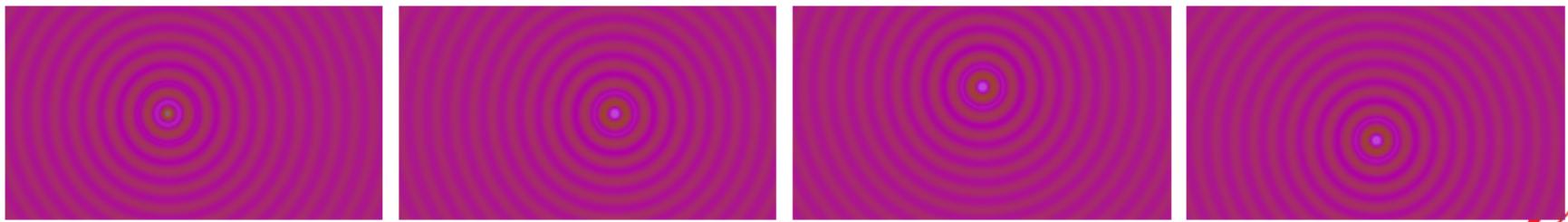
Experimentos de discriminación

El estímulo

Presentamos el siguiente estímulo a los voluntarios,

$$\mathbf{r}(x, y) = \mathbf{r}_0 + \sqrt{k\epsilon} J_0 \left(k \sqrt{x^2 + y^2} \right),$$

con su centro en cuatro posiciones posibles y ϵ a lo largo de las direcciones \mathbf{S} , $\mathbf{L} - \mathbf{M}$ y $\mathbf{L} + \mathbf{M}$.



Experimentos de discriminación

La tarea

- Se fija la frecuencia k y la dirección de la modulación $\hat{\epsilon}$.



Experimentos de discriminación

La tarea

- Se fija la frecuencia k y la dirección de la modulación $\hat{\epsilon}$.
- Se le presenta al voluntario un punto negro en el centro de la pantalla durante 2 segundos.



Experimentos de discriminación

La tarea

- Se fija la frecuencia k y la dirección de la modulación $\hat{\epsilon}$.
- Se le presenta al voluntario un punto negro en el centro de la pantalla durante 2 segundos.
- Se le presenta el estímulo con una amplitud ϵ descentrado al voluntario durante 1 segundo.



Experimentos de discriminación

La tarea

- Se fija la frecuencia k y la dirección de la modulación $\hat{\epsilon}$.
- Se le presenta al voluntario un punto negro en el centro de la pantalla durante 2 segundos.
- Se le presenta el estímulo con una amplitud ϵ descentrado al voluntario durante 1 segundo.
- Se le pide al voluntario que eliga con las flechas del teclado la posición del centro, o que responda al azar en caso de que no haya percibido el estímulo.



Experimentos de discriminación

La tarea

- Se fija la frecuencia k y la dirección de la modulación $\hat{\epsilon}$.
- Se le presenta al voluntario un punto negro en el centro de la pantalla durante 2 segundos.
- Se le presenta el estímulo con una amplitud ϵ descentrado al voluntario durante 1 segundo.
- Se le pide al voluntario que eliga con las flechas del teclado la posición del centro, o que responda al azar en caso de que no haya percibido el estímulo.
- Se repite el procedimiento un total de 50 veces cambiando el valor de la amplitud.

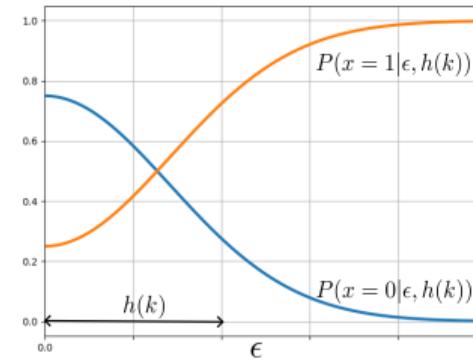


Experimentos de discriminación

Probabilidad de acierto y error

Propusimos que la probabilidad de que una persona se equivoque ($x = 0$) o acierte ($x = 1$) la posición del centro, dado $h(k)$ y ϵ , es

$$P(x|\epsilon, h) = \begin{cases} \frac{3}{4} \exp [-(\epsilon/h(k))^2] & \text{si } x = 0 \\ 1 - \frac{3}{4} \exp [-(\epsilon/h(k))^2] & \text{si } x = 1. \end{cases}$$



El umbral de discriminación $h(k)$ representa una amplitud característica del estímulo.

Experimentos de discriminación

Estimación del umbral de discriminación

Dado el conjunto (x_1, x_2, \dots, x_n) de aciertos y errores, y un conjunto $(\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n)$ de amplitudes para un dado k utilizamos el estimador de máxima verosimilitud para estimar el $h(k)$ del voluntario, el cual consiste en maximizar el logaritmo de la función de verosimilitud

$$\begin{aligned}\log \mathcal{L}(h) &= \log \left[\prod_{j=1}^n P(x_j | \epsilon_j, h) \right] \\ &= \sum_{j/x_j=0} \log \left(\frac{3}{4} \exp \left[-(\epsilon_j/h(k))^2 \right] \right) + \sum_{j/x_j=1} \log \left(1 - \frac{3}{4} \exp \left[-(\epsilon_j/h(k))^2 \right] \right)\end{aligned}$$

Experimentos de discriminación

Muestreo de amplitudes

Mostrar amplitudes muestreadas de una distribución uniforme no es óptimo.



Experimentos de discriminación

Muestreo de amplitudes

Mostrar amplitudes muestreadas de una distribución uniforme no es óptimo.

¿Cómo aprovechar la información que conseguimos en cada trial para acelerar la convergencia al valor del umbral?



Experimentos de discriminación

Muestreo de amplitudes

Mostrar amplitudes muestreadas de una distribución uniforme no es óptimo.

¿Cómo aprovechar la información que conseguimos en cada trial para acelerar la convergencia al valor del umbral?

Idea:

Maximizar la información de Fisher $J(h|\epsilon)$ de la distribución respecto a la amplitud ϵ .



Experimentos de discriminación

Maximización de la información de Fisher

La información de Fisher $J(h|\epsilon)$ está definida como

$$J(h|\epsilon) = - \left\langle \frac{\partial^2}{\partial h^2} \log p(x|h, \epsilon) \right\rangle,$$

y representa qué tan informativa es una muestra x para estimar el valor de h .



Experimentos de discriminación

Maximización de la información de Fisher

La información de Fisher $J(h|\epsilon)$ está definida como

$$J(h|\epsilon) = - \left\langle \frac{\partial^2}{\partial h^2} \log p(x|h, \epsilon) \right\rangle,$$

y representa qué tan informativa es una muestra x para estimar el valor de h .

Maximizando $J(h|\epsilon)$ respecto ϵ obtenemos

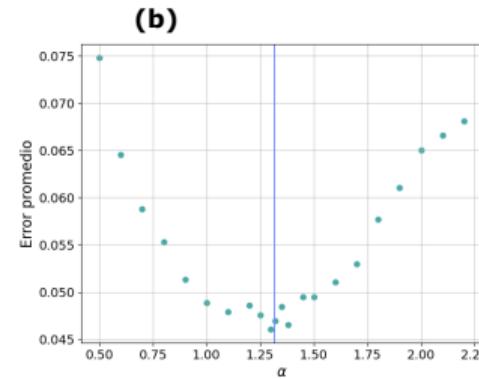
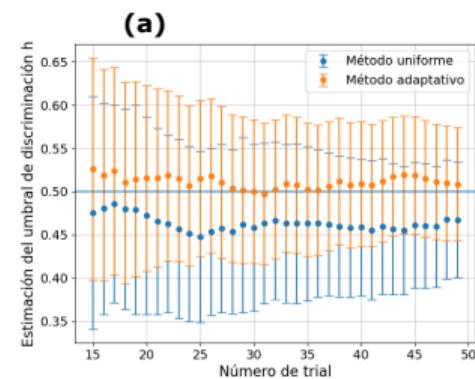
$$\epsilon_{n+1} = \alpha h_n \text{ con } \alpha \approx 1.317.$$



Experimentos de discriminación

Comprobación de la maximización

- Se simuló un sujeto virtual que contestaba $x = 0$ o $x = 1$ dado un valor de h y amplitudes ϵ .
- En un promedio de 20 realizaciones se observa que el método adaptativo converge más rápidamente.
- El error promedio en el paso 50 en 1600 realizaciones se minimiza en $\alpha \approx 1.317$.



Experimentos de discriminación

Protocolo experimental

- Se midieron los umbrales de discriminación en 7 voluntarios.



Experimentos de discriminación

Protocolo experimental

- Se midieron los umbrales de discriminación en 7 voluntarios.
- Cada voluntario hizo 100 iteraciones para 5 valores de frecuencia espacial k en promedio.



Experimentos de discriminación

Protocolo experimental

- Se midieron los umbrales de discriminación en 7 voluntarios.
- Cada voluntario hizo 100 iteraciones para 5 valores de frecuencia espacial k en promedio.
- 3 voluntarios midieron solo en la dirección **S**, 2 midieron en las direcciones **S** y **L** + **M**, y 2 midieron en las direcciones **S**, **L** + **M** y **L** - **M**.



Resultados

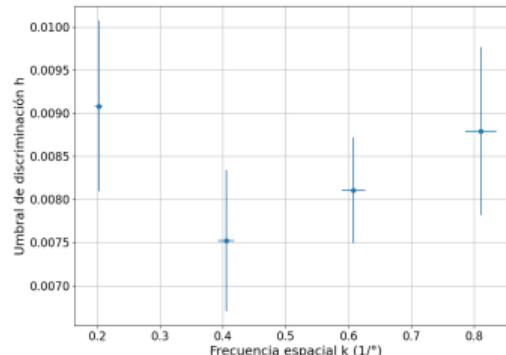


Resultados

Algunas curvas de umbrales de discriminación: Eje S

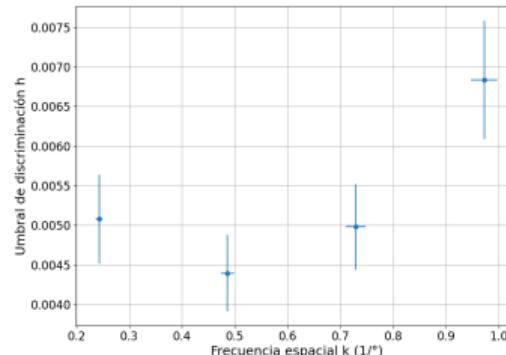
Voluntario B:

$$k_{\min} = (0.41 \pm 0.01) \frac{1}{\text{grados}}$$
$$\sigma = (2.43 \pm 0.06)^\circ$$



Voluntario M:

$$k_{\min} = (0.48 \pm 0.02) \frac{1}{\text{grados}}$$
$$\sigma = (2.05 \pm 0.08)^\circ$$

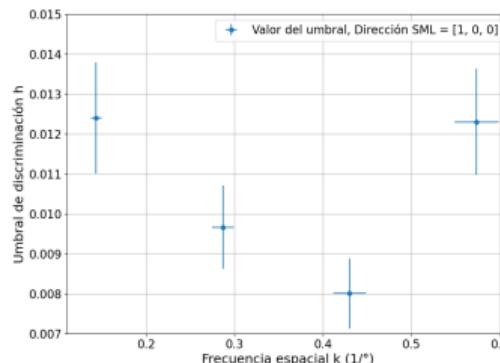


Resultados

Eje S y L+M

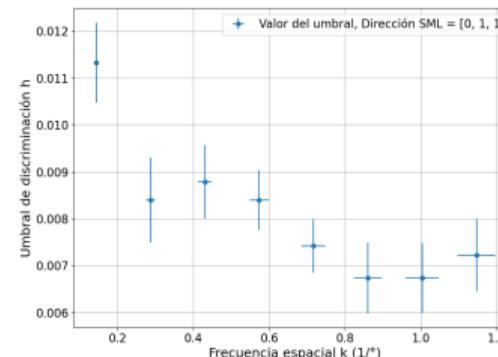
Voluntarie I:

$$k_{\min} = (0.43 \pm 0.03) \frac{1}{\text{grados}}$$
$$\sigma = (2.3 \pm 0.2)^\circ$$



Voluntarie I:

$$k_{\min} = (1.00 \pm 0.04) \frac{1}{\text{grados}}$$
$$\sigma = (1.00 \pm 0.04)^\circ$$



Resultados

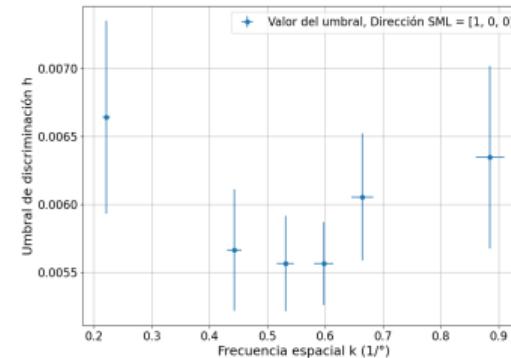
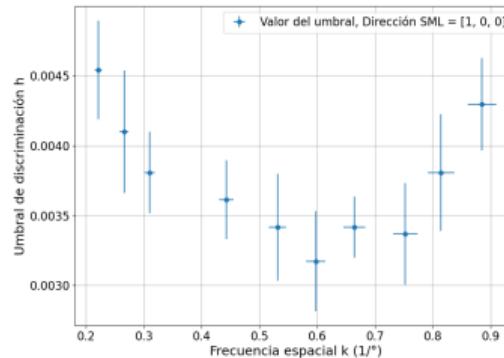
Eje S con diferentes fondos

Voluntarie T: $SML_{\text{fondo}} = [0.13, 0.30, 0.35]$

$$k_{\min} = (0.59 \pm 0.03) \frac{1}{\text{grados}}$$
$$\sigma = (1.69 \pm 0.08)^\circ$$

$SML_{\text{fondo}} = [0.25, 0.30, 0.35]$

$$k_{\min} = (0.59 \pm 0.08) \frac{1}{\text{grados}}$$
$$\sigma = (1.7 \pm 0.2)^\circ$$

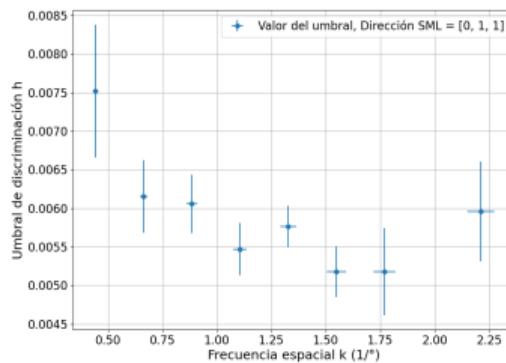


Resultados

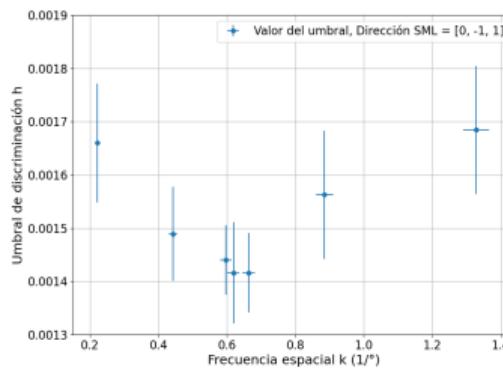
Eje L + M y L - M

Voluntarie T:

$$k_{\min} = (1.75 \pm 0.04) \frac{1}{\text{grados}}$$
$$\sigma = (0.57 \pm 0.02)^\circ$$

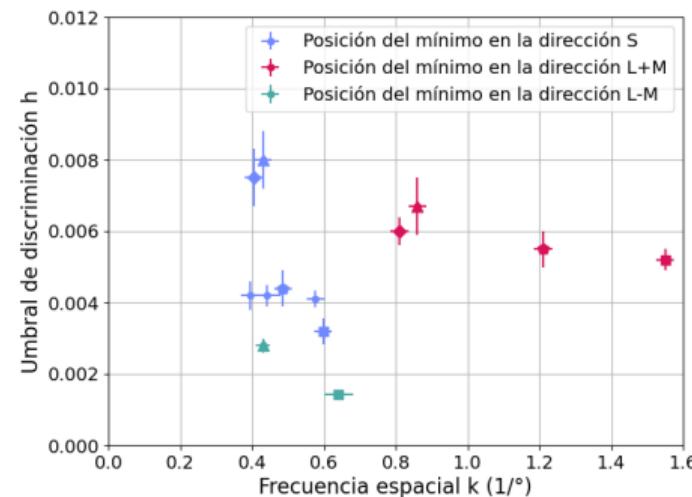


$$k_{\min} = (0.62 \pm 0.06) \frac{1}{\text{grados}}$$
$$\sigma = (1.6 \pm 0.2)^\circ$$



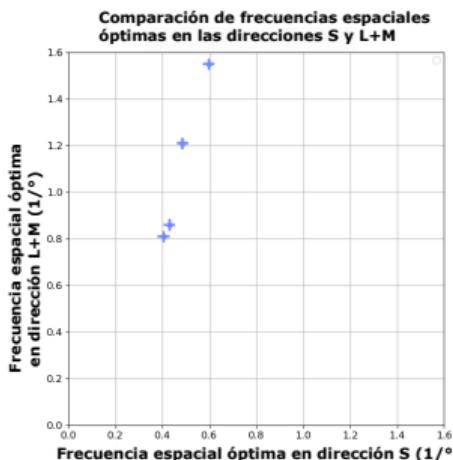
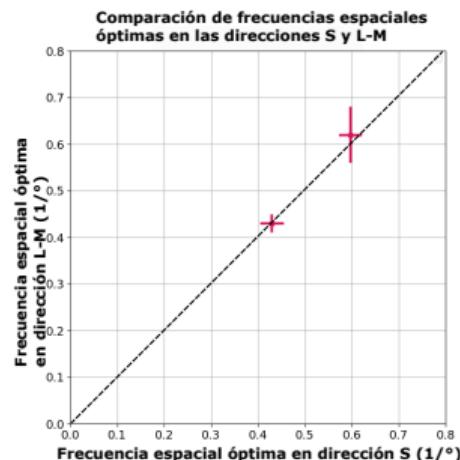
Resultados

- Se realizaron experimentos en 7 voluntarios, donde, para cada uno de ellos y cada dirección medida se encontraron mínimos de discriminación.
- Las frecuencias óptimas en los ejes **S** y **L - M** son similares, mientras que en el eje **L + M** toman valores mayores.



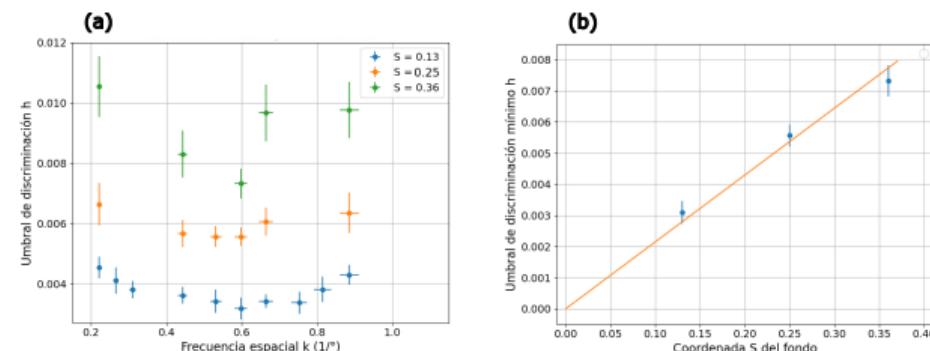
Resultados

- Para los voluntarios que midieron en **S** y **L - M** se obtuvieron los mismos valores de frecuencia óptima.
- Las frecuencias óptimas en **L + M** son aproximadamente el doble que en la dirección **S**.



Resultados

- El umbral de discriminación depende del valor del fondo. Según la ley de Weber, el umbral crece linealmente con este.
- El valor del umbral en la dirección **S** aumenta linealmente con el valor **S** del fondo utilizado.



Resultados

- Para comparar umbrales en diferentes direcciones utilizamos el *umbral normalizado*, la pendiente dada por la ley de Weber $\frac{h_\alpha}{c_\alpha}$.
- En ambos sujetos que midieron en las tres direcciones se observa que el umbral normalizado toma su menor valor en la dirección **L + M**.

Sujeto	$\frac{h_s}{c_s}$	$\frac{h_{L-M}}{c_{L-M}}$	$\frac{h_{L+M}}{c_{L+M}}$
T	0.024	0.034	0.011
I	0.062	0.067	0.015

Coordenadas del fondo
LMS = {0.13, 0.30, 0.35}.



Resultados

En resumen

- Se hallaron mínimos para el umbral de discriminación h .



Resultados

En resumen

- Se hallaron mínimos para el umbral de discriminación h .
- La frecuencia característica en la dirección de la componente lumínica del estímulo (**L+M**) es mayor que la frecuencia característica en las componentes cromáticas (**S** y **L - M**).



Resultados

En resumen

- Se hallaron mínimos para el umbral de discriminación h .
- La frecuencia característica en la dirección de la componente lumínica del estímulo (**L+M**) es mayor que la frecuencia característica en las componentes cromáticas (**S** y **L - M**).
- En los ejes cromáticos parece haber la misma frecuencia espacial característica.



Resultados

En resumen

- Se hallaron mínimos para el umbral de discriminación h .
- La frecuencia característica en la dirección de la componente lumínica del estímulo (**L+M**) es mayor que la frecuencia característica en las componentes cromáticas (**S** y **L - M**).
- En los ejes cromáticos parece haber la misma frecuencia espacial característica.
- El umbral cambia dependiendo del fondo linealmente en cierto rango (ley de Weber).



Resultados

En resumen

- Se hallaron mínimos para el umbral de discriminación h .
- La frecuencia característica en la dirección de la componente lumínica del estímulo (**L+M**) es mayor que la frecuencia característica en las componentes cromáticas (**S** y **L - M**).
- En los ejes cromáticos parece haber la misma frecuencia espacial característica.
- El umbral cambia dependiendo del fondo linealmente en cierto rango (ley de Weber).
- El umbral normalizado es menor en la dirección de la componente lumínica del estímulo que en sus componentes cromáticas.



Conclusiones

Modelamos a la red neuronal a cargo de procesar la inducción cromática como un campo receptivo con parámetros característicos.



Conclusiones

Modelamos a la red neuronal a cargo de procesar la inducción cromática como un campo receptivo con parámetros característicos.

Dedujimos que, para acceder a estos parámetros del campo receptivo, debemos presentar un estímulo cuya cromaticidad debe ser modelado por una función de Bessel J_0 .



Conclusiones

Modelamos a la red neuronal a cargo de procesar la inducción cromática como un campo receptivo con parámetros característicos.

Dedujimos que, para acceder a estos parámetros del campo receptivo, debemos presentar un estímulo cuya cromaticidad debe ser modelado por una función de Bessel J_0 .

Diseñamos y llevamos a cabo experimentos perceptuales en siete voluntarios y obtuvimos distancias características para aproximadamente 2° (eje S y L-M) y 0.75° (eje L+M).

Conclusiones

Observamos que el umbral de discriminación es menor en la dirección de la componente lumínica del estímulo (**L + M**) que en sus componentes cromáticas (**S** y **L - M**).



Conclusiones

Observamos que el umbral de discriminación es menor en la dirección de la componente lumínica del estímulo (**L + M**) que en sus componentes cromáticas (**S** y **L - M**).

La frecuencia característica del eje **L + M** es mayor a la del eje **S** y **L - M**.



Conclusiones

Observamos que el umbral de discriminación es menor en la dirección de la componente lumínica del estímulo (**L + M**) que en sus componentes cromáticas (**S** y **L - M**).

La frecuencia característica del eje **L + M** es mayor a la del eje **S** y **L - M**.

El umbral de discriminación depende del valor del fondo linealmente en cierto rango (ley de Weber).



¿Preguntas?

