

R e t I N a B o x

Lecciones

Versión 1.0



Visión general del sistema visual: ¿Cómo vemos?

El procesamiento visual comienza en la **retina**, una fina lámina de tejido cerebral sensible a la luz ubicada en la parte posterior del ojo (sí, la retina es parte del cerebro).

Dentro de la retina, unas neuronas llamadas fotorreceptores detectan la luz y la convierten en señales electroquímicas. A través de un proceso llamado fototransducción, los cambios en la intensidad de la luz alteran el potencial de membrana del fotorreceptor, es decir, la diferencia de voltaje entre el interior y el exterior de la célula. Este cambio en el potencial de membrana afecta la cantidad de glutamato, un neurotransmisor, que libera el fotorreceptor.

Estas señales mediadas por los fotorreceptores se transmiten —por medio de neuronas intermediarias llamadas células bipolares— a las células ganglionares, que envían la información retiniana hacia el cerebro a través del nervio óptico (**Figura 1**).

Dentro de la retina, los complejos patrones de conectividad entre las células bipolares, horizontales, amacrinas y ganglionares (**Figura 1**) transforman las señales de los fotorreceptores (que por sí solas solo codifican el aumento o disminución en la luminancia) en respuestas selectivas a características visuales. Esto significa que las células ganglionares responden únicamente cuando ciertos rasgos visuales están presentes en el entorno. Por ejemplo, una célula ganglionar puede responder solo cuando aparece un punto de luz de cierto tamaño, mientras que otra puede responder únicamente cuando un estímulo visual se desplaza de izquierda a derecha en el campo visual.

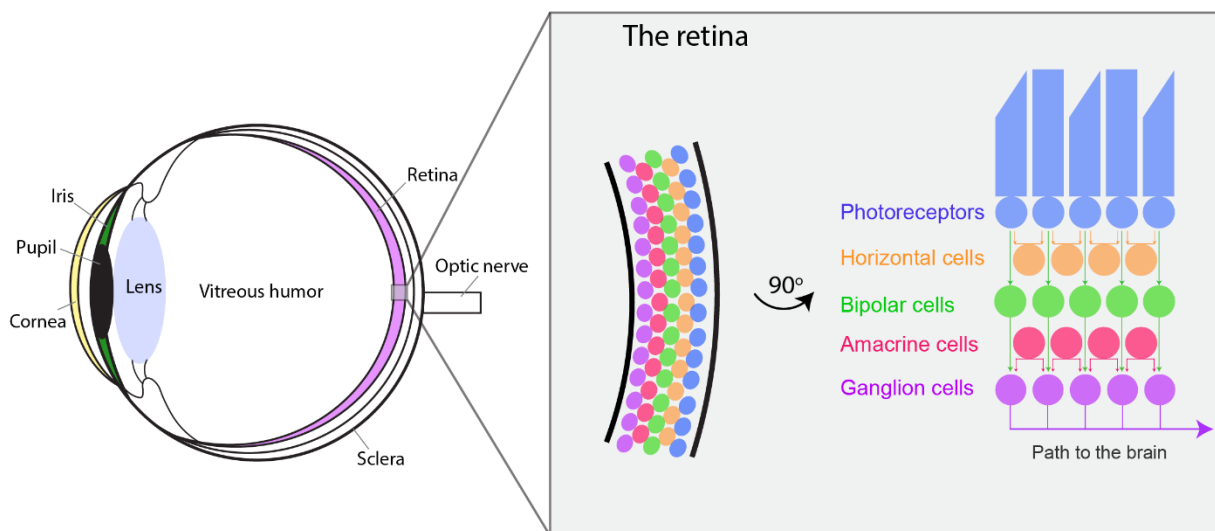


Figura 1. Diagrama simplificado de la retina. La luz entra al ojo y es detectada por los fotorreceptores, que envían señales a las células ganglionares a través de una red adicional de células retinianas. Las células ganglionares integran estas señales y envían la información al resto del cerebro para su interpretación.

Sin embargo, la anatomía de la retina es un poco más compleja de lo descrito anteriormente. Los fotorreceptores (y todos los demás tipos de células representados en la figura) están organizados en una disposición densa y tridimensional (**Figura 2**). Dentro de una capa retiniana determinada, las células forman un **mosaico** bidimensional (**Figura 2**). Por ejemplo, en la capa de fotorreceptores, cada fotorreceptor individual capta los cambios de luminancia de una pequeña porción de la escena visual, pero en conjunto todos los fotorreceptores codifican la imagen completa que representa tu campo visual.

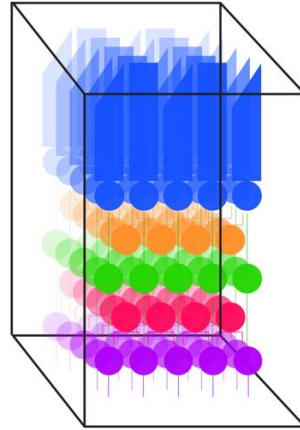


Figura 2. Diagrama de la retina que ilustra la disposición en forma de mosaico de las células en la retina.

*Para obtener una visión más detallada de la retina, visita theopenbrain.org y <https://webvision.med.utah.edu/>.

RetINaBox: un modelo simplificado del sistema visual temprano

Como ya viste, la retina real es compleja, con muchos tipos de células intrincadamente conectadas para formar una multitud de circuitos. RetINaBox es un modelo simplificado de la retina (**Figura 3**) que conserva los principios clave del procesamiento visual, pero ofrece una herramienta práctica con la que puedes cablear, ajustar y probar cómputos visuales. En otras palabras, fue diseñado para que descubras cómo funciona la retina. RetINaBox contiene una matriz de 3 x 3 de fotorreceptores modelo, que se conectan directamente a dos células ganglionares retinianas modelo.

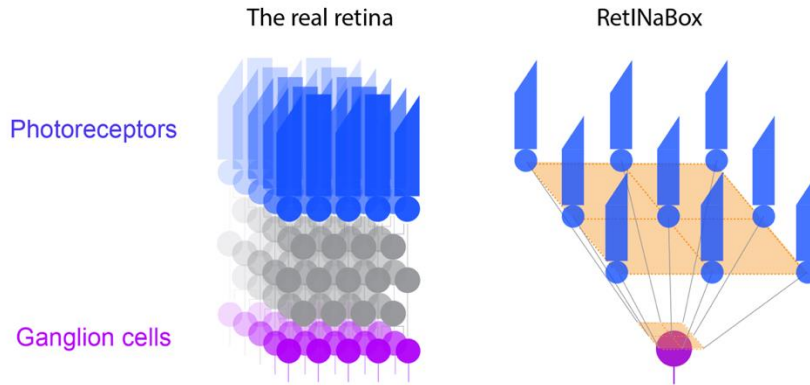


Figura 3. Circuito del modelo simplificado de RetINaBox. La luz es detectada por los fotorreceptores, que hacen sinapsis o se conectan con las células ganglionares. A la derecha, se muestra la conectividad de la matriz de 3 x 3 fotorreceptores modelo hacia una de las dos células ganglionares modelo de RetINaBox.

RetINaBox tiene algunos componentes clave (**Figura 4**):

- Una matriz de 3 x 3 fotodiodos sensibles a la luz, que actúan como fotorreceptores modelo. Detectan cambios en la luz infrarroja (proveniente de los LED infrarrojos del estímulo visual de RetINaBox) y convierten estas señales visuales en señales eléctricas, que luego envían a 2 células ganglionares retinianas modelo.
- Dos **células ganglionares retinianas modelo (CGRs)** que integran las señales provenientes de los fotorreceptores modelo.

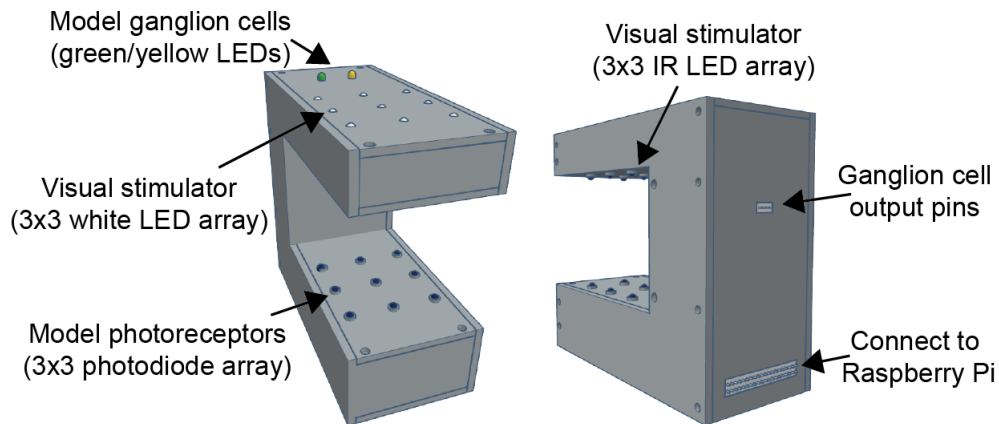


Figura 4. Diagrama anotado de RetINaBox (vista frontal a la izquierda, vista posterior a la derecha).

Cada célula ganglionar responde cuando recibe señales positivas de un número suficiente de fotorreceptores, según un umbral definido por el usuario. Cada fotorreceptor puede conectarse a una o ambas células ganglionares. **Tú decides:**

- **Polaridad:** si cada fotorreceptor activa (**excitatorio, +1**) o silencia (**inhibitorio, -1**) a la célula ganglionar a la que está conectado, o si permanece **inactivo**.
- **Retardo temporal:** cuánto tarda la señal del fotorreceptor en llegar a la célula ganglionar (esto modela conectividades asimétricas del circuito que pueden ser útiles para habilitar el procesamiento del movimiento).
- **Umbral:** el número de entradas positivas de fotorreceptores que necesita recibir una célula ganglionar para responder. Si la suma combinada de todas las entradas conectadas no supera el umbral asignado, la célula ganglionar permanece en silencio.

Para ayudarte a realizar experimentos con RetINaBox, diseñamos una **Interfaz Gráfica de Usuario (GUI)** fácil de usar. Esta tiene tres componentes (**Figura 5**):

- (1) **Visual Stimulus Controller (Controlador de estímulos visuales)** (ver **Fig. 5**, panel izquierdo; **Fig. 6**): controla la activación de una matriz de LED de 3 x 3, lo que permite un control preciso de qué fotorreceptores modelo se activan. Tú decides qué LEDs están enviando luz activamente a sus respectivos fotorreceptores (LEDs “activados”; la activación ocurre cuando seleccionas un LED y luego enciendes el Controlador de Estímulos Visuales). Los LEDs pueden activarse en modo “**Static**” (estímulos estacionarios) o en modo “**Motion**” (estímulos que se mueven hacia la izquierda o derecha a velocidades lenta, media o rápida). Usa el botón “**On/Off**” para alternar la activación de los LEDs.
- (2) **Connectivity Manager (Administrador de conectividad)** (ver **Fig. 5**, panel central): permite conectar cada fotorreceptor modelo a una (o ambas) células ganglionares, especificando la **polaridad** de la señal (**inactivo**, **excitatorio (+)**, o **inhibitorio (-)**) y el **retardo** (ninguno, corto, medio o largo).
- (3) **Signal Monitor (Monitor de señales)** (ver **Fig. 5**, panel derecho): muestra la entrada y salida de cada fotorreceptor, así como la salida de cada célula ganglionar (la activación de la célula ganglionar también se indica mediante los LEDs verde y amarillo en la parte superior de RetINaBox).



Figura 5. GUI de RetINaBox, que incluye el Controlador de estímulos visuales (izquierda), el Administrador de conectividad (centro) y el Monitor de señales (derecha).

Este sistema es suficiente para construir células ganglionares modelo con campos receptivos de centro-periferia, selectividad a la orientación y selectividad a la dirección, ¡tal como en la retina real!

Por favor, consulta el **Manual de Usuario si necesitas más ayuda con el software.*

Como probar tus circuitos

Cada lección (describas a continuación) incluye actividades prácticas que te desafían a construir circuitos retinianos que respondan a diferentes tipos de estímulos visuales. Para cada circuito que construyas, tendrás dos maneras de probar su selectividad visual:

1. **Activación de LEDs (ver Fig. 6):** activa manualmente diferentes combinaciones de LEDs en el **Controlador de Estímulos Visuales** para estimular los fotorreceptores modelo con distintos patrones de luz. Esta es una forma rápida de comprobar que tu circuito se comporta como esperas (es decir, que tus células ganglionares responden selectivamente a estímulos visuales específicos). Usa el botón “On/Off” para alternar la activación de los LEDs.

(1)

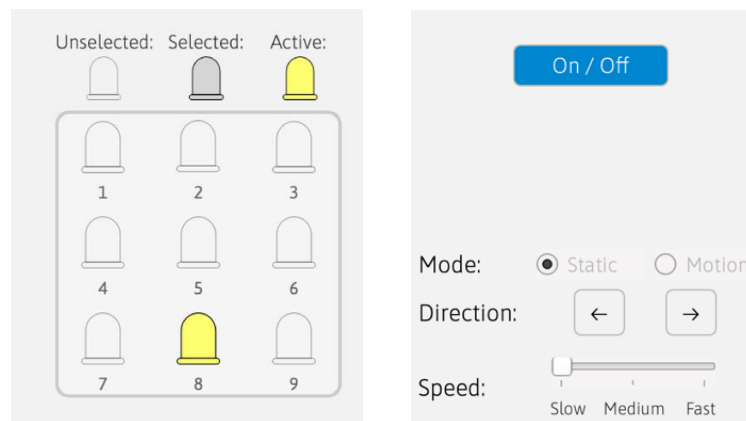


Figura 6. Interfaz del Controlador de Estímulos Visuales para seleccionar y activar LEDs en la matriz de 3 x 3 y generar patrones personalizados de estimulación luminosa.

- (2) **Estimulación visual manual con la Herramienta de Estímulos Visuales (ver Fig. 7):** activa toda la matriz de LEDs. Luego, crea patrones con tu Herramienta de Estímulos Visuales (arcilla de modelar sobre una placa de plástico transparente). Pasa esta placa entre la matriz de LEDs y la matriz de fotorreceptores para bloquear selectivamente la luz que llega a ciertos fotorreceptores. Esta es la mejor manera de comprobar que tu circuito visual responde selectivamente a entradas visuales estáticas específicas. Alternativamente, si eres hábil, puedes usar tus manos o trozos de papel/cartón para controlar el patrón de luz que incide en la matriz de fotorreceptores de RetINaBox. Para estímulos en movimiento, recomendamos simplemente pasar tu mano de izquierda a derecha sobre la matriz de LEDs de RetINaBox.

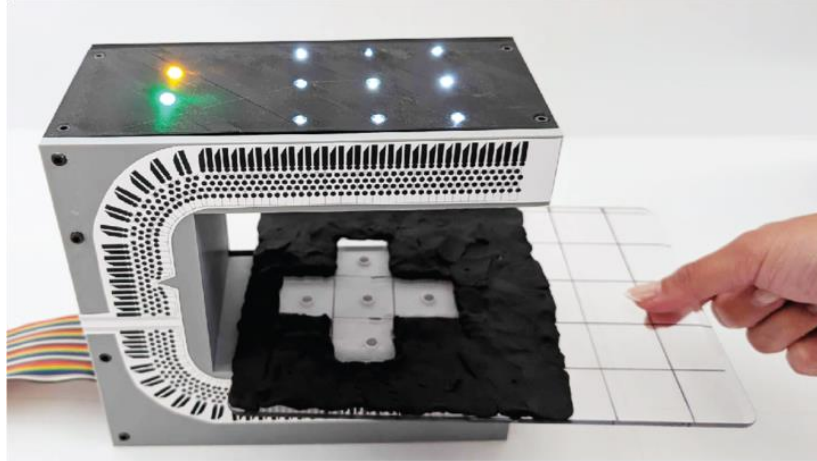


Figura 7. Demostración de la Herramienta de Estímulos Visuales colocada entre la matriz de LEDs y los fotorreceptores modelo, para bloquear selectivamente la luz y entregar patrones visuales precisos a la matriz de fotorreceptores de RetINaBox.

Lección 1: Centro-Periferia

¿Cómo sabe tu sistema visual en qué enfocarse en el mundo?

En la retina, los campos receptivos de centro-periferia ayudan a las neuronas visuales a responder selectivamente al contraste local de luminancia, es decir, a las diferencias de intensidad luminosa entre partes cercanas del campo visual. Las neuronas visuales con campos receptivos de centro-periferia responden cuando, dentro de la pequeña parte de la escena visual que ven, una parte de su campo receptivo está iluminada y otra está oscura (como texto negro sobre un fondo blanco). Estas células no responden bien a escenas homogéneas (ej., una pared blanca uniforme), lo que significa que tu sistema visual está optimizado para detectar estímulos visuales que se distinguen de un fondo simple.

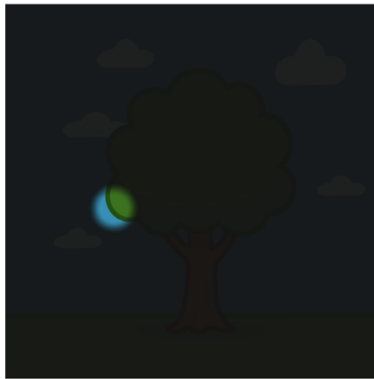
¿Por qué es útil esto?

(1) Ubicar dónde está algo en el mundo

La manera en la que nuestro sistema visual detecta la ubicación de un objeto empieza al nivel de neuronas individuales. Cada neurona visual tiene un **campo receptivo**: una región específica de la retina (y, por tanto, del mundo visual) donde los cambios en la intensidad luminosa pueden alterar la actividad de esa neurona. Puedes pensar en un campo receptivo como un *foco de luz*: cada neurona solo ve lo que ocurre en su *foco de luz*, de esta manera que solo ve una parte específica del mundo.



Cell 1's receptive field



Cell 2's receptive field

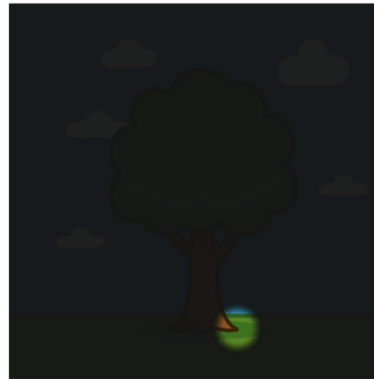
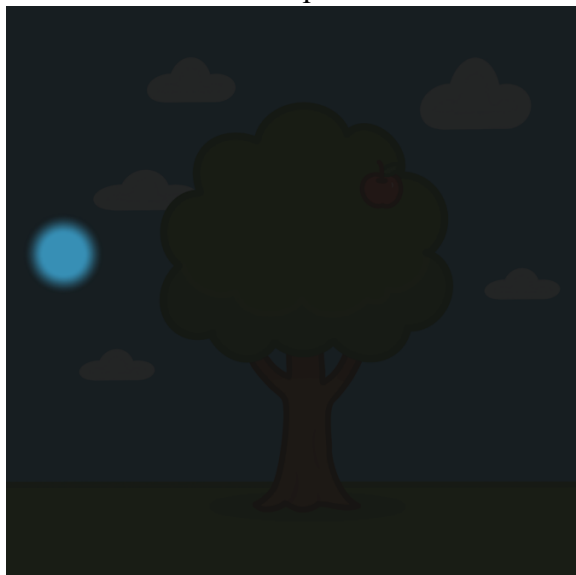


Figura 8. *Diferentes neuronas tienen diferentes campos receptivos.*

Cuando una neurona se activa, no solo indica que está detectando su característica visual preferida, sino también que esa característica se encuentra dentro de su campo receptivo. Como los campos receptivos de muchas neuronas diferentes cubren el espacio visual de manera organizada, el conjunto de respuestas permite al cerebro determinar *donde* esta esa característica.

Cell 1's receptive field



Cell 2's receptive field

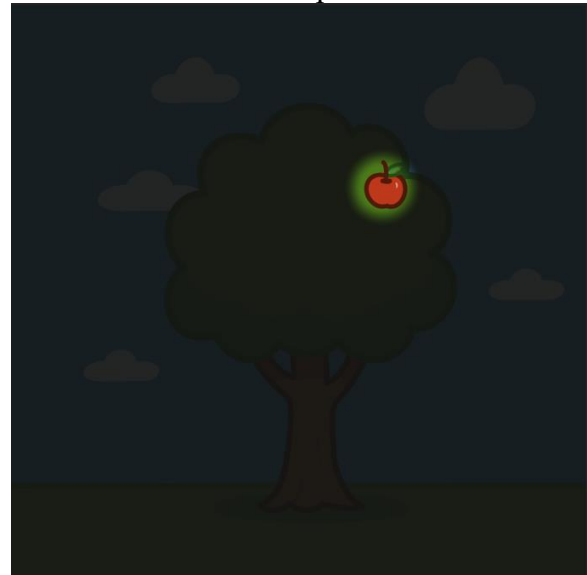


Figure 9. Ejemplo: detectar una manzana roja entre hojas verdes. Imagina dos neuronas, ambas buscan manzanas, pero con campos receptivos en distintas ubicaciones. Solo la neurona de la derecha, cuyo campo coincide con la posición de la manzana, responderá.

(2) Saber qué tamaño tiene algo

Además de saber *dónde* está algo, también necesitamos saber *qué tamaño* tiene. Para un único fotorreceptor, esto puede ser ambiguo: la característica que detecta podría ser pequeña y estar confinada a su campo receptivo, o lo bastante grande como para activar también los campos receptivos de fotorreceptores vecinos. El sistema visual resuelve en parte esta ambigüedad mediante los campos receptivos de centro-periferia: cuando un estímulo visual está perfectamente dimensionado para caer directamente sobre una neurona (un área denominada centro del campo receptivo), la célula responde de manera máxima; sin embargo, si el estímulo visual es más grande y se extiende hacia la región adyacente a la célula (un área denominada periferia del campo receptivo), esto reduce la respuesta de la neurona. Esto significa que cada neurona responde mejor a un estímulo visual de un tamaño particular, correspondiente a su centro de campo receptivo, y al contraste de luminancia entre el centro y la periferia. Como diferentes neuronas pueden tener centros y periferias de campo receptivo de distintos tamaños, distintas neuronas pueden tener preferencias por estímulos visuales de diferentes dimensiones.

Objetivo de la lección 1

Construir un circuito sencillo que imite una célula ganglionar retiniana de centro-entorno para explorar cómo el sistema visual detecta los puntos focales de luz. Luego, probar el circuito activando diferentes LEDs (en modo estático) para comprobar la selectividad de la célula ganglionar. Finalmente, realizar la estimulación visual en condiciones reales con la Herramienta de Estímulo Visual para comprobar la robustez de su circuito de centro-entorno (consulte la sección "Cómo probar tus circuitos" para más detalles).

Actividad #1: construir un detector de puntos con un campo receptivo ON-centro/OFF-entorno

Las neuronas con campos receptivos **ON-centro/OFF-entorno** se activan (ON) con la luz en el centro de su campo receptivo, pero se inhiben (OFF) con la luz en el área circundante.

Utilice la interfaz gráfica de usuario (GUI) para construir un circuito (RGC1) con una célula ganglionar ON-centro/OFF-entorno que responda solo cuando el fotorreceptor modelo del centro de la matriz 3x3 se active con la luz, pero no cuando alguno de los fotorreceptores modelo circundantes también se active, ni cuando un pequeño punto se encuentre sobre cualquier otro fotorreceptor modelo.

Actividad #2: construir un segundo detector de puntos con una ubicación diferente del campo receptivo

Tu siguiente tarea es crear una célula ganglionar (RGC2) con la misma preferencia de tamaño (como en la Actividad 1), pero con un campo receptivo en una posición diferente en la matriz de

fotorreceptores. Al mover el estímulo visual con un pequeño punto, deberías poder activar cada célula RGC, pero solo una a la vez, según la posición del estímulo.

Actividad #3: construir dos detectores de puntos con preferencias para tamaños de punto diferentes

Tu siguiente tarea es crear **dos células ganglionares diferentes** (RGC1 y RGC2) con la misma ubicación del campo receptivo (centro), pero con sensibilidad a puntos de **diferentes tamaños**. Una célula ganglionar debe detectar un punto pequeño de luz, mientras que la otra debe detectar un punto **más grande**. Si creas dos puntos de diferentes tamaños con la herramienta de estímulo visual, solo deberías poder activar RGC1 con el punto pequeño y RGC2 con el punto más grande.

Desafío: Descifrar un mensaje con campos receptivos centro-periferia

Ahora que sabes cómo crear células ganglionares que responden selectivamente a puntos de tamaños específicos en ubicaciones concretas, te desafiamos a aplicar estos conocimientos sobre los campos receptivos centro-periferia para **descifrar un mensaje oculto**.

Se te presentará una serie de estímulos visuales, cada uno representado como una matriz de 3x3 de fotorreceptores. Algunos fotorreceptores estarán activados (amarillo) y otros inactivos (negro). Cada estímulo corresponde a **una letra** del mensaje secreto.

También se te proporcionará un **código** que te ayudará a descifrar el mensaje. Este código indicará las preferencias visuales de las dos células ganglionares de RetINaBox, RGC1 y RGC2. Además, te permitirá interpretar la actividad de las células ganglionares de RetINaBox en cuatro letras (0: célula inactiva; 1: célula activa).

Tu tarea:

1. Desde la pesataña de Menu en el GUI, accede a ‘Code Breaker’ (Lessons > Lesson 1 > Code Breaker).
2. En Connectivity Manager, configura RetINaBox de manera que las dos células ganglionares respondan a los estímulos visuales indicados. Nota importante: *asegúrate de que sea posible activar ambas células ganglionares simultáneamente con un solo estímulo visual*.
3. Utiliza la herramienta de Estimulación Visual para presentar los estímulos visuales del código a RetINaBox y monitorizar las respuestas de las células ganglionares.
4. Para cada estímulo visual, utiliza el código para traducir la salida de RGC1/RGC2 en una letra.
5. Repite el proceso para cada estímulo y reconstruya el mensaje secreto completo.

Observa el ejemplo a continuación (**Figura 10**):

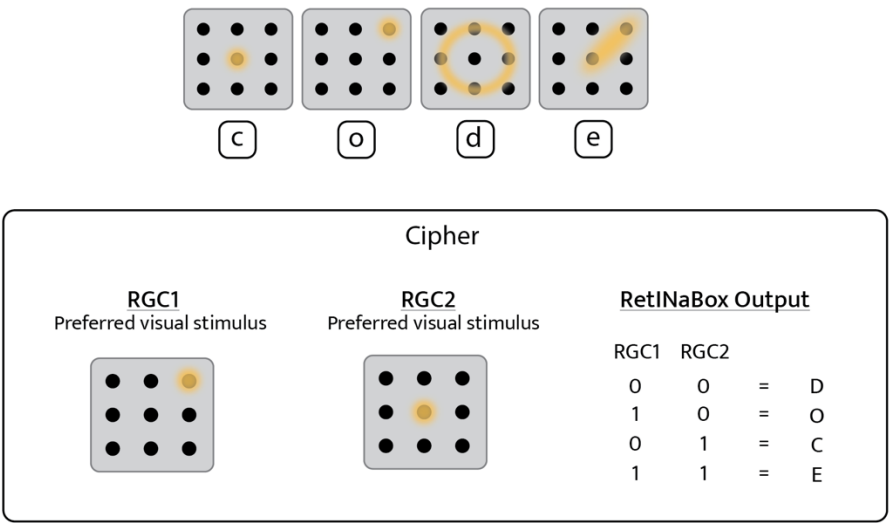


Figure 10 –Ejemplo del juego de descifrado.

Desafío #1 de la actividad de descifrado de códigos

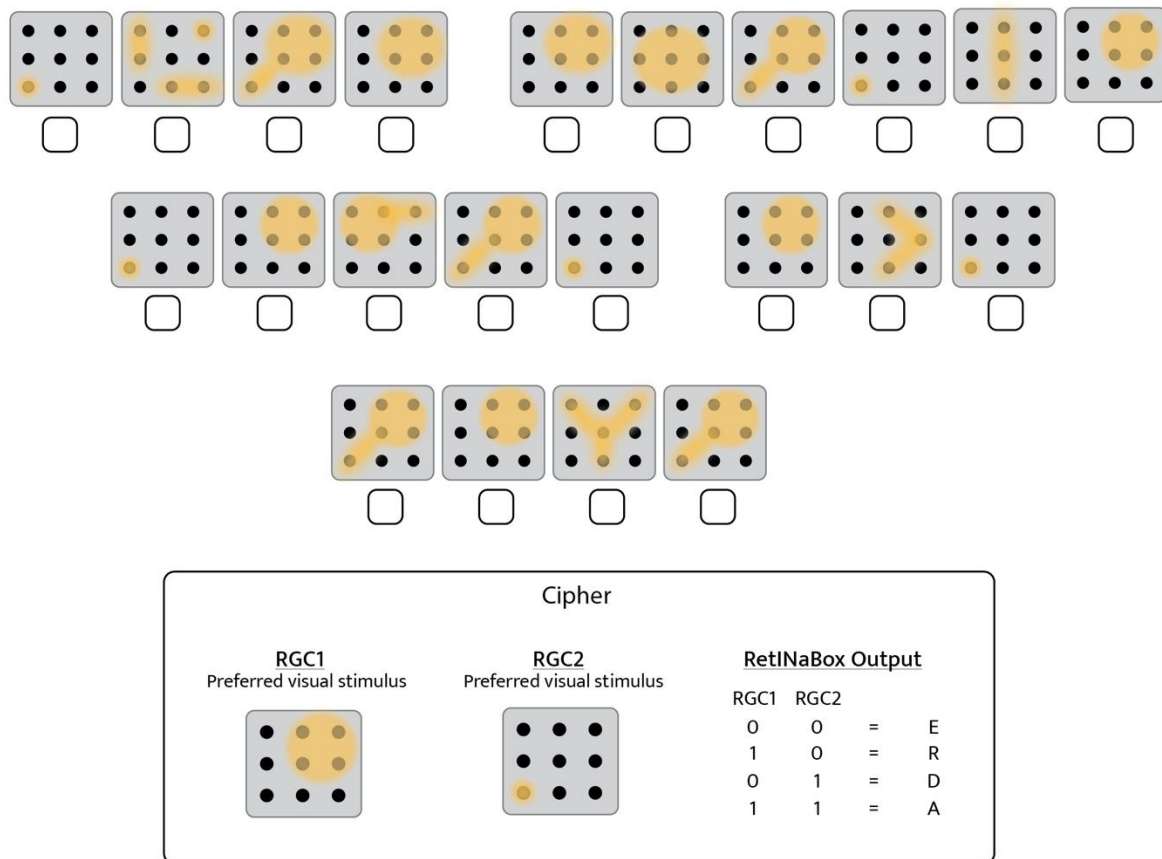


Figure 11 – Desafío 1 para el juego de descifrado.

**Consulta el anexo del plan de lección para encontrar la solución a este y otros desafíos de descifrado de códigos.*

Lección 2: Selectividad de orientación

¿Cómo reconocemos los objetos en el mundo?

Como vimos en la Lección 1, nuestro sistema visual es muy sensible al contraste de luminosidad local. Esto significa que es excelente para detectar líneas y bordes en la imagen visual. Sin embargo, en lugar de procesar la imagen visual simplemente mediante un conjunto de detectores de píxeles con campos receptivos de tipo centro-periferia, nuestro sistema visual también cuenta con neuronas que combinan los campos receptivos de varias neuronas con centros receptivos espacialmente adyacentes. Esto permite que algunas neuronas visuales, en lugar de ser sensibles únicamente al contraste de luminosidad en una pequeña zona de la imagen, sean selectivas a bordes o líneas de orientación específica dentro de su campo receptivo (ver **Fig. 12**), un fenómeno conocido como selectividad de orientación. En esta lección, exploraremos cómo las células

ganglionares de la retina pueden volverse selectivas a líneas de orientaciones específicas y cómo podemos utilizar estos detectores de características para crear un detector de formas.

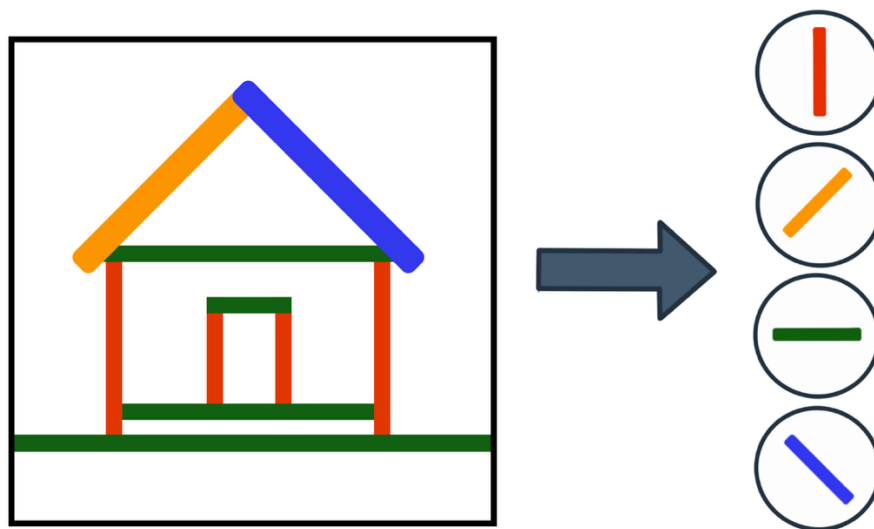


Figura 12. Ejemplo: una casa puede parecer un objeto único y familiar, pero el cerebro la analiza descomponiéndola en numerosas líneas y bordes con diferentes ángulos.

Objetivo

Construir y probar dos células ganglionares retinianas para modelar su selectividad a la orientación y utilizar la respuesta combinada de estas dos células para crear un detector de formas. Primero, prueba los circuitos activando diferentes combinaciones de LEDs (en el modo "estático" de la interfaz gráfica). Luego, realiza la estimulación visual real utilizando la herramienta de estimulación visual, creando una forma que combine las dos líneas orientadas que estimulan las células ganglionares RGC1 y RGC2.

Actividad #1: construir una célula ganglionar que detecte una línea vertical

Configura el circuito de RGC1 para que solo responda a una línea vertical delgada ubicada en una zona específica de la matriz de fotorreceptores. La célula ganglionar no debe responder a un punto de luz, ni a una línea de la misma longitud de cualquier orientación o grosor, o centrada en una parte diferente de la matriz.

Actividad #2: construir una segunda célula ganglionar que detecte una línea diagonal

Construye el circuito de RGC2 para que responda a una línea del mismo grosor que en la Actividad 1, pero solo si está orientada diagonalmente. Esta segunda célula ganglionar no debe responder a una línea de otra orientación o grosor, ni a una línea de la misma orientación pero centrada en una parte diferente de la matriz.

Actividad #3: construir dos células ganglionares que detecten líneas verticales de diferente grosor.

Configure las células ganglionares RGC1 y RGC2 de forma que ambas respondan a líneas verticales, pero que una responda selectivamente a una línea fina y la otra a una gruesa.

Desafío: Cree un detector de formas con campos receptivos selectivos a la orientación.

Tu tarea es combinar la salida de dos células ganglionares con selectividad a la orientación para detectar una forma específica: la forma resultante de la combinación de las líneas que activan las células ganglionares 1 y 2. Por ejemplo, puedes crear un detector para una X, una T, una L o un +.

Para hacerlo más interesante, primero debes crear un circuito de alarma que suene solo cuando se detecte la forma objetivo; es decir, que la alarma suene solo cuando ambas células ganglionares estén activadas. Para crear este circuito, consulta el manual de usuario de RetINaBox, páginas 14-15. Una vez creado el circuito, conecte las salidas de las dos células ganglionares (los pines de salida digital de 3,3 V en la parte posterior de RetINaBox) y un cable a tierra al circuito de la alarma (ver **Fig. 13**). Si la conexión es correcta, la alarma sonará solo al presentar la forma objetivo. Este método es similar al utilizado por muchos neurocientíficos en sus experimentos. Por ejemplo, David Hubel y Torsten Wiesel, quienes descubrieron la selectividad a la orientación en la corteza visual de los gatos, solían conectar la señal de registro electrofisiológico a un altavoz y escuchaban la respuesta de las neuronas al presentar estímulos visuales.

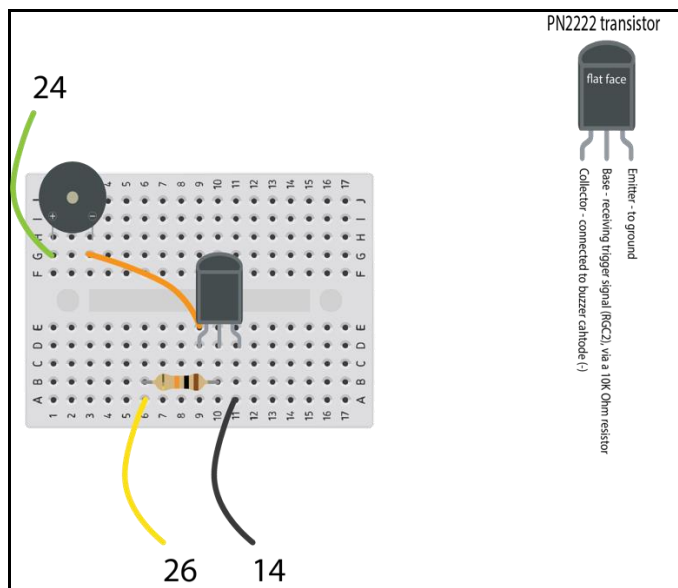


Figura 13. Diagrama de conexión del circuito del buzzer (parlante zumbador). Consulte las páginas 14 y 15 del manual de usuario de RetINaBox para obtener instrucciones detalladas.

Lección 3: Selectividad direccional

Hasta ahora, hemos visto que algunas neuronas visuales son sensibles al tamaño y la posición de un estímulo visual (Lección 1) o a la orientación de una línea en el campo visual (Lección 2). Resulta que algunas neuronas visuales también son sensibles a la **dirección del movimiento**; responden mejor cuando algo se mueve en una dirección específica dentro del campo visual.

¿Por qué es importante esto? Estas respuestas selectivas a la dirección ayudan a nuestro cerebro a determinar si algo se acerca o se aleja de nosotros (ver **Fig 14**). Incluso nos ayuda a diferenciar el movimiento que nosotros mismos generamos (al mover el cuerpo, la cabeza o los ojos) del movimiento que se produce de forma independiente (como el vuelo de un pájaro en el cielo).

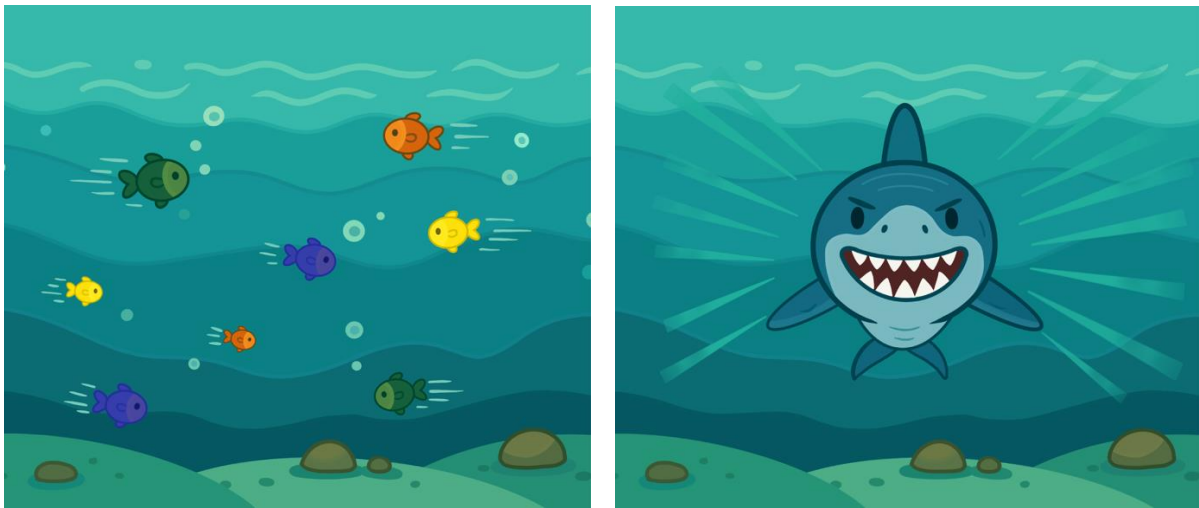


Figura 14. Ejemplo: la capacidad de detectar el movimiento en el entorno visual puede ser importante para muchas tareas. Los animales, como los peces en este ejemplo, se basan en esta habilidad para distinguir entre presas potenciales y otros peces (por ejemplo, a la izquierda: peces pequeños nadando en direcciones aleatorias) y los depredadores (a la derecha: un tiburón grande que se acerca rápidamente).

Para generar preferencias por estímulos que se mueven en direcciones específicas, nuestro sistema visual aprovecha el hecho de que un estímulo en movimiento activa fotoreceptores ubicados espacialmente a lo largo de su trayectoria, los cuales se conectan a una misma neurona visual en secuencia temporal. Es decir, los fotoreceptores situados en el borde delantero del estímulo en movimiento se activan primero, mientras que los situados en el borde posterior se activan después. Esto significa que, para una célula ganglionar que responde a un estímulo en movimiento, existe un desfase temporal entre la recepción de señales de los fotoreceptores del borde delantero y los del borde posterior de su campo receptivo. (ver **Fig. 15**).

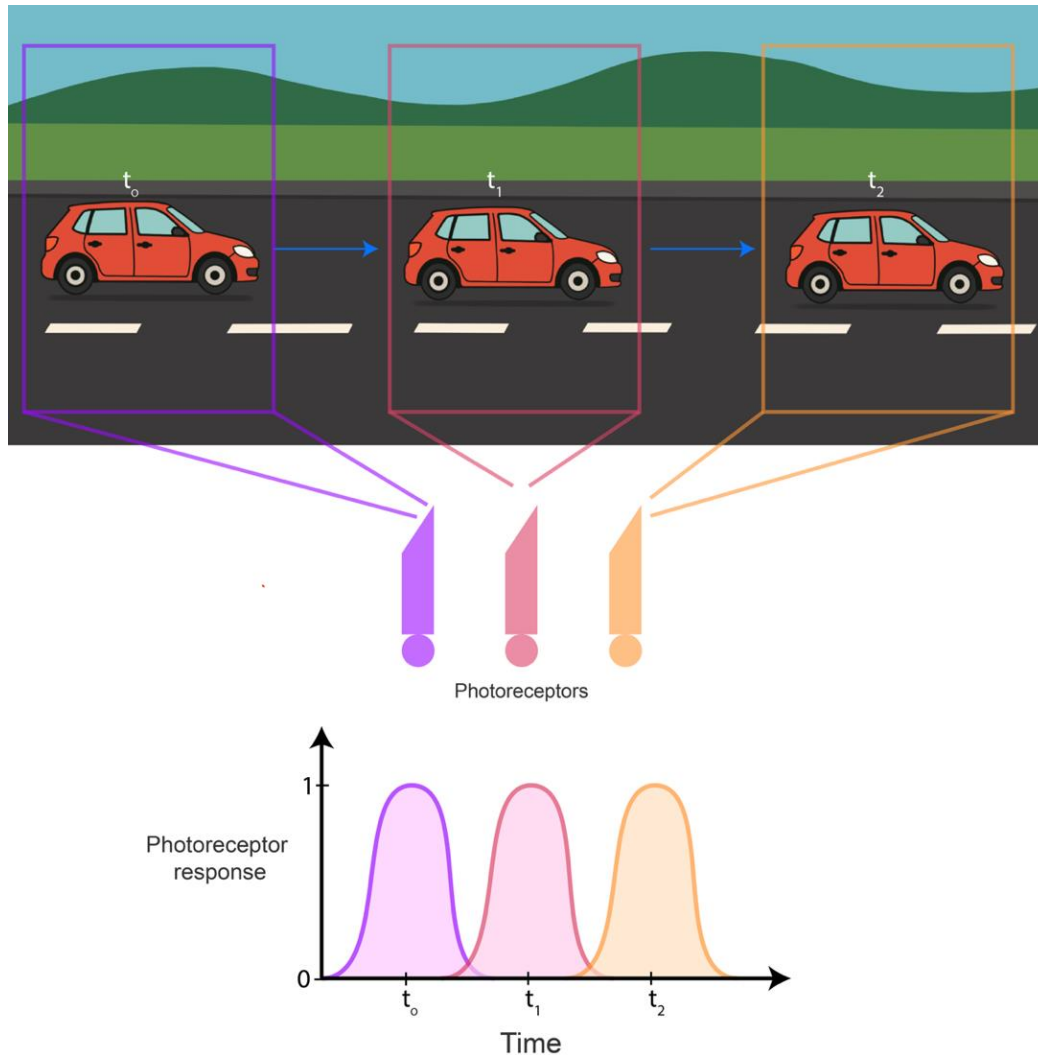


Figure 15. Cuando un objeto se mueve a través del campo visual, los distintos fotorreceptores, con campos receptivos espacialmente desplazados, se activan secuencialmente, en el orden en que perciben el objeto. Los fotorreceptores situados en el borde delantero del movimiento (izquierda) responden primero, seguidos de los del centro y, finalmente, de los del borde posterior (derecha). Esta activación secuencial genera señales con desfase temporal que el sistema visual utiliza para detectar la dirección del movimiento.

Objetivo: diseñar un circuito que simule el funcionamiento de una célula ganglionar retiniana con selectividad direccional, para comprender cómo el sistema visual detecta el movimiento. Primero, pruebe el circuito activando diferentes combinaciones de LEDs (utilice el modo 'Motion' de la interfaz gráfica (GUI) y seleccione la velocidad y la dirección del movimiento). A continuación, mueva la mano frente al campo de visión de RetINaBox.

La clave de la selectividad direccional reside en las conexiones anatómicas asimétricas que procesan de forma diferente los estímulos visuales que se mueven en una dirección u otra. En RetINaBox, estas diferencias asimétricas se implementan mediante **retardo de tiempo**, que se puede configurar de forma asimétrica en el 'Connectivity Manager' a lo largo del eje horizontal de la matriz de 3x3 de fotorreceptores. Estos retardos aseguran que las señales de entrada a la

célula ganglionar se sumen (y que esta célula se active) solo cuando el estímulo se mueve en la dirección preferida.

Nota

- *En esta sección, puedes mover la mano de un lado a otro entre los LED y los foto-receptores para comprobar el funcionamiento del circuito. *No recomendamos usar la herramienta de estímulo visual para probar estímulos en movimiento, debido a los artefactos en los bordes que pueden generar respuestas erróneas cuando la herramienta sale o entra en el campo visual de RetINaBox.*
- *Dependiendo de los tiempos de retardo que hayas configurado para cada foto-receptor, podría ser necesario probar diferentes velocidades de movimiento (es decir, mover la mano a diferentes velocidades) para observar la respuesta de las células ganglionares a un movimiento específico.*

Actividad #1: crear una célula ganglionar selectiva a la dirección de movimiento hacia la izquierda ←

Construye un circuito en el que el sensor RGC1 reaccione ante una línea vertical que se mueve hacia la izquierda. Para probar el circuito, mueve la mano por encima del panel de sensores en dirección tanto a la izquierda como a la derecha.

Activity #2: crear una célula ganglionar selectiva a la dirección de movimiento hacia la derecha →

Next, build a second circuit where RGC2 responds to a vertical line moving rightwards. Test your circuit by moving your hand across your array in both right and left directions.

Actividad #3: crear una neurona ganglionar selectiva de dirección que prefiera movimientos lentos y no movimientos rápidos →

Construye un circuito en el que el sensor RGC1 reaccione a una línea vertical que se mueve lentamente hacia la derecha, mientras que el sensor RGC2 reaccione a una línea vertical que se mueve en la misma dirección, pero a mayor velocidad. Prueba tu circuito moviendo la mano hacia la derecha a diferentes velocidades sobre la matriz de sensores. *Consejo: para generar grupos de control de velocidad (RGC) con preferencias para diferentes velocidades, reflexiona sobre los efectos que tendrá modificar el tiempo de retardo.

Desafío: Block Breaker mediante circuitos con selección de dirección

Block Breaker es un juego arcade en el que los jugadores controlan una palanca moviéndola hacia la izquierda y hacia la derecha para rebotar una pelota y destruir filas de bloques. El objetivo es eliminar todos los bloques sin dejar que la pelota se caiga. Su tarea consiste en configurar dos células ganglionares con selectividad direccional opuesta (es decir, crear dos células ganglionares

con una selectividad direccional robusta) y utilizarlas como controles de entrada para el juego dentro de la interfaz gráfica de RetINaBox.

- **Paso 1:** En Connectivity Manager, configura ambos circuitos de células ganglionares de forma que la RGC1 sea selectiva *únicamente* para el movimiento hacia la izquierda y la RGC2 sea selectiva únicamente para el movimiento hacia la derecha.
- **Paso 2:** Carga el juego. Desde la pestaña ‘Menu’ en la interfaz gráfica, navega a ‘Block Breaker’ (Lessons > Lesson 3 > Block Breaker).
- **Paso 3:** ¡Ya está todo listo para jugar (ver **Fig. 16**)! La barra gris del juego de ‘Block Breaker’ se controla moviendo un estímulo visual (la mano) de izquierda a derecha dentro del campo de visión de RetINaBox.

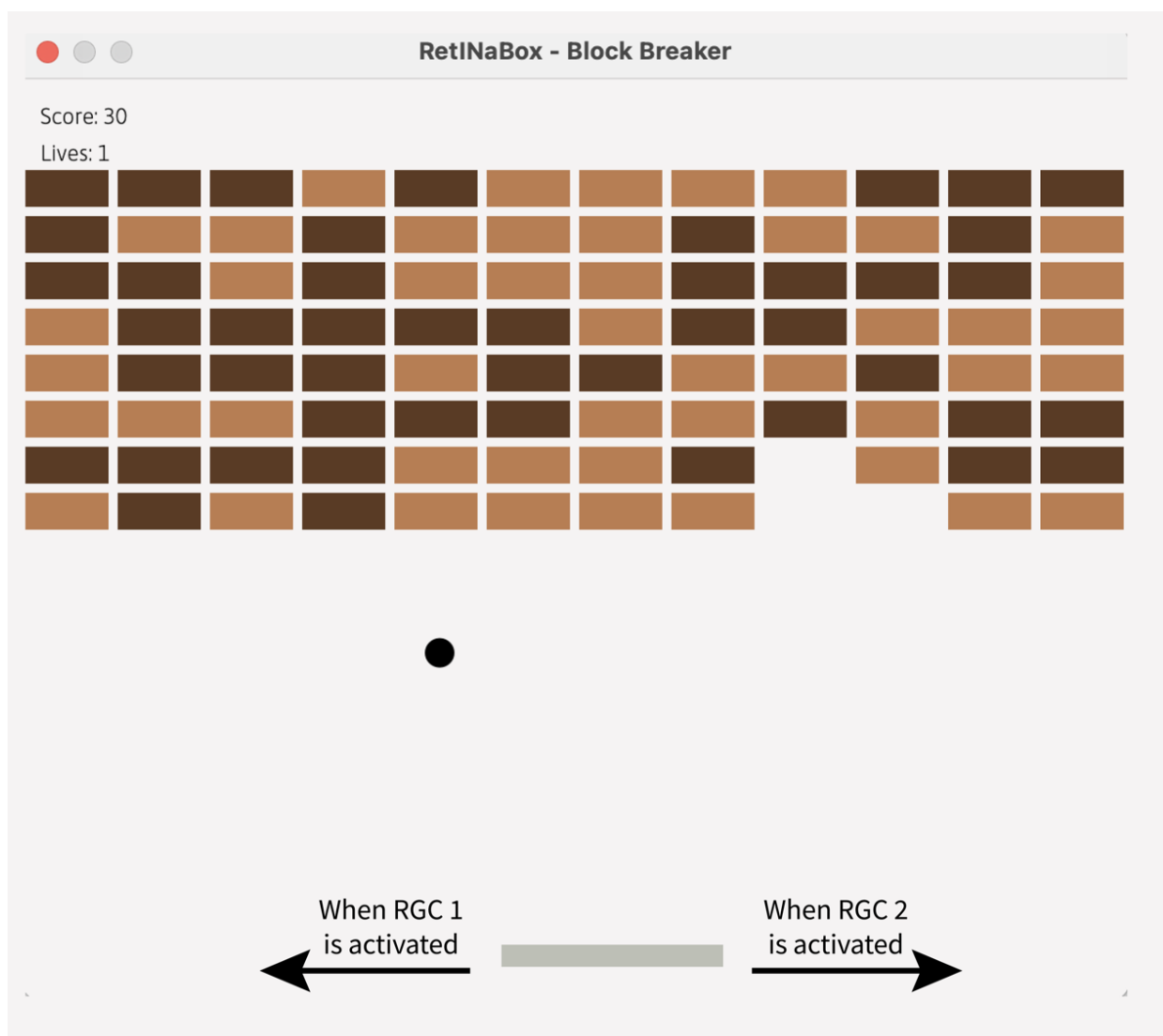


Figura 16. Block Breaker en la interfaz gráfica de RetINaBox. La activación de RGC1 debería mover la barra gris hacia la izquierda, mientras que la activación de RGC2 debería moverla hacia la derecha.

Lección 4: Modo Descubrimiento (Discovery Mode)

¡Bienvenidos al Modo Descubrimiento! ¡Llegaste hasta aquí, lo que significa que estás listo para realizar experimentos reales! En esta sección, podrás experimentar cómo es trabajar como neurocientífico especializado en la visión.

Hasta ahora, has explorado los campos receptivos de tipo centro-periferia, los selectivos a la orientación y los selectivos a la dirección, circuitos que ya han sido ampliamente estudiados por los investigadores de la visión. Sin embargo, la investigación para comprender qué estímulos visuales activan a las neuronas aún están en curso. Incluso hoy en día, los neurocientíficos siguen trabajando para descubrir qué tipos de estímulos activan mejor las diferentes neuronas visuales en distintas regiones del cerebro. *Ahora te toca a ti descubrir qué estímulos visuales activan mejor algunas neuronas visuales recientemente descubiertas y determinar qué características de la conectividad neuronal subyacen a esta selectividad.*

En Modo Descubrimiento (ver **Fig. 17**), hay tres niveles de dificultad (fácil, medio y difícil), cada uno con sus propios desafíos. Para completar cada desafío, deberás descubrir (es decir, responder correctamente) el estímulo visual objetivo de la célula ganglionar en cuestión (la respuesta visual que activa dicha célula) y la conectividad del circuito (la configuración en el Connectivity Manager) que subyace a esta respuesta selectiva. En cada desafío, comenzarás con 100 puntos, pero cada respuesta incorrecta te restará 5 puntos. Tu objetivo es completar cada desafío obteniendo la mayor puntuación posible.

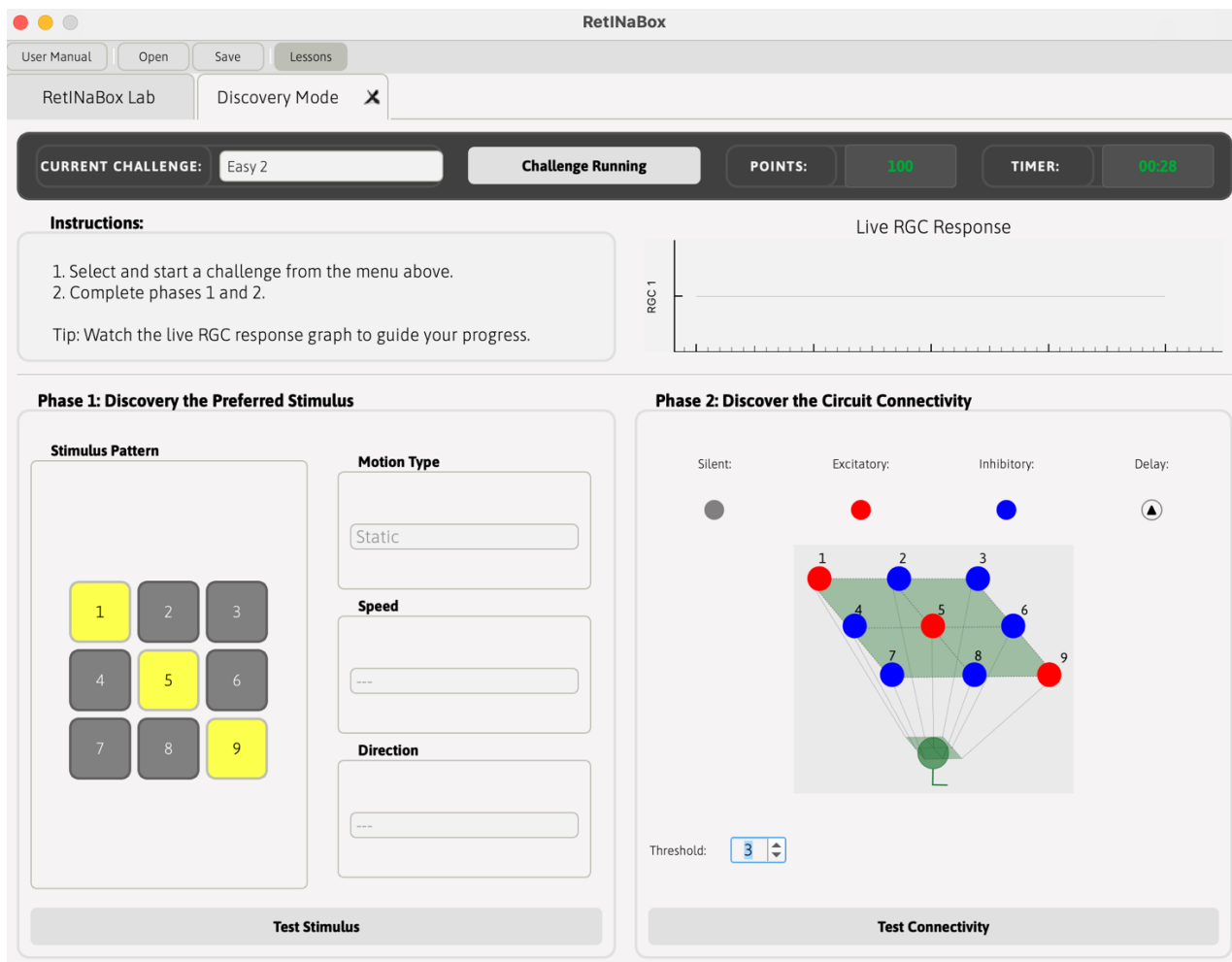


Figura 17. Discovery Mode GUI. Cada desafío consta de dos fases: (1) descubrir el estímulo preferido (izquierda) y (2) descubrir la conectividad del circuito (derecha)

Cada desafío en Modo Descubrimiento consta de dos pasos:

(1) Descubrir el estímulo preferido

Desde la pestaña ‘Menu’, acceda a ‘Discovery Mode’ (Lessons > Lesson 4 > Discovery Mode). Tras seleccionar un circuito desconocido del menú desplegable en la interfaz gráfica (GUI), su primera tarea será determinar a qué estímulo responde la célula ganglionar. ¿Prefiere una forma específica? ¿Un movimiento en una dirección particular? Utilice la herramienta de estímulos visuales para probar diferentes estímulos estáticos. Para probar los estímulos direccionales, utilice la mano. Los circuitos de RetiNaBox son muy selectivos a estímulos visuales específicos, así que asegúrese de estar seguro antes de enviar su respuesta. ¡Algunas células ganglionares prefieren estímulos estáticos y otras, estímulos en movimiento!

(2) Descubrir la conectividad del circuito

Una vez que hayas identificado la característica a la que está sintonizada la célula ganglionar, el siguiente paso será determinar cómo logra esa selectividad. ¿Cómo se conectan los fotorreceptores a la célula ganglionar? ¿Qué tipo de retrasos, polaridades o disposiciones espaciales de los fotorreceptores generan la respuesta selectiva de la célula ganglionar? *Aplica la configuración adecuada en el 'Connectivity Manager' para que coincida con la selectividad de características que hayas identificado.*

¡Mucha suerte! *El éxito de tu laboratorio depende de que consiga la financiación para su proyecto.*

Anexo

Soluciones de la lección 1: Campo receptivo centro-periferia

Actividad # 1: crear de un detector de puntos con un campo receptivo de tipo ON-centro/OFF-periferia

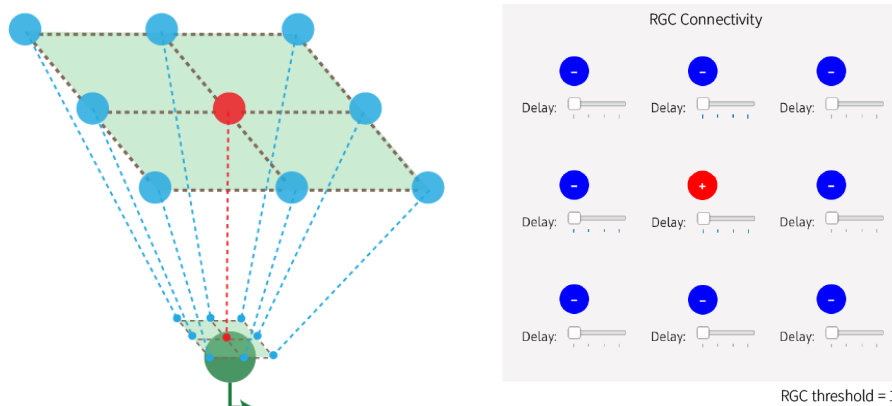
El fotorreceptor central (rojo) es excitatorio (+): activa la célula ganglionar al detectar la luz.

- Conecte el fotorreceptor central a una célula ganglionar con **polaridad positiva** (excitatoria).

Los fotorreceptores periféricos (azules) son inhibitorios (-): inhiben la célula ganglionar al activarse.

- Conecta cada fotorreceptor periférico a la misma célula ganglionar con polaridad negativa (inhibitoria).

Establezca el umbral de la célula ganglionar en 1. La célula ganglionar **solo** se activará cuando el fotorreceptor central reciba luz. Sin embargo, si alguno de los fotorreceptores periféricos también se activa, su efecto inhibitorio anulará la excitación y la célula ganglionar no se activará.



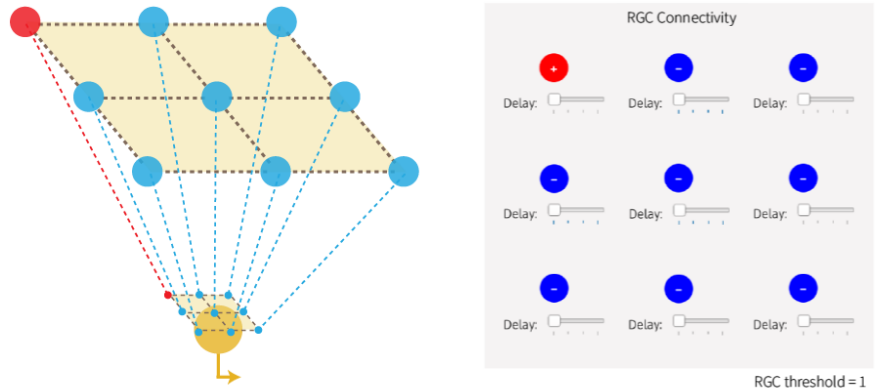
Lección 1, Actividad 1: Entradas y conexiones a la célula RGC1 (célula centro-periferia con campo receptivo central)

Actividad #2: crear un segundo detector de puntos con una ubicación de campo receptivo diferente.

Ten en cuenta que los siguientes son solo dos ejemplos de posibles soluciones correctas. Podrías haber seleccionado cualquier campo receptivo dentro del área de 3x3 para cualquiera de las células ganglionares.

Ejemplo de solución 1

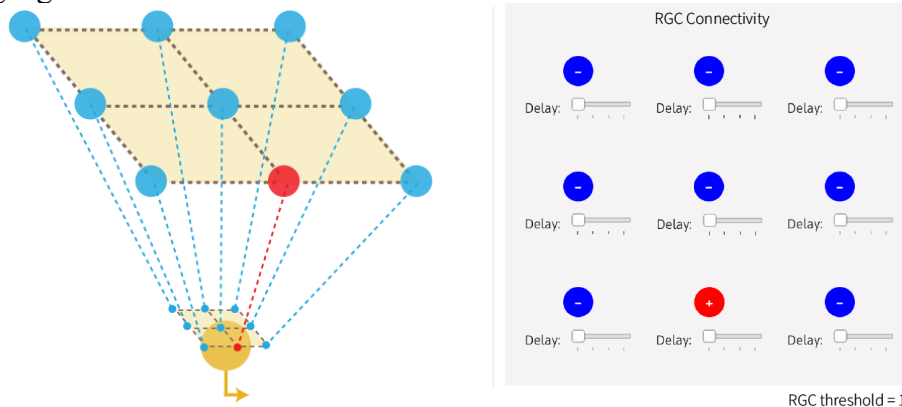
Entradas de RGC2: El fotorreceptor del extremo (en rojo) es excitatorio (+): activa la célula ganglionar al detectar la luz. Todos los demás fotorreceptores circundantes (en azul) son inhibitorios (-): inhiben la célula ganglionar cuando se activan. Establece el umbral de activación de la célula ganglionar en 1.



Lección 1, Actividad 2 – Solución de ejemplo: Entradas y conexiones a RGC2 (célula centro-periferia con campo receptivo en la esquina superior izquierda)

Ejemplo de solución 2

Entradas de RGC2: El fotorreceptor periférico (rojo) es excitatorio (+): activa la célula ganglionar al detectar la luz. Todos los demás fotorreceptores circundantes (azules) son inhibitorios (-): inhiben la célula ganglionar cuando se activan. Establecer el umbral de activación de la célula ganglionar en 1.

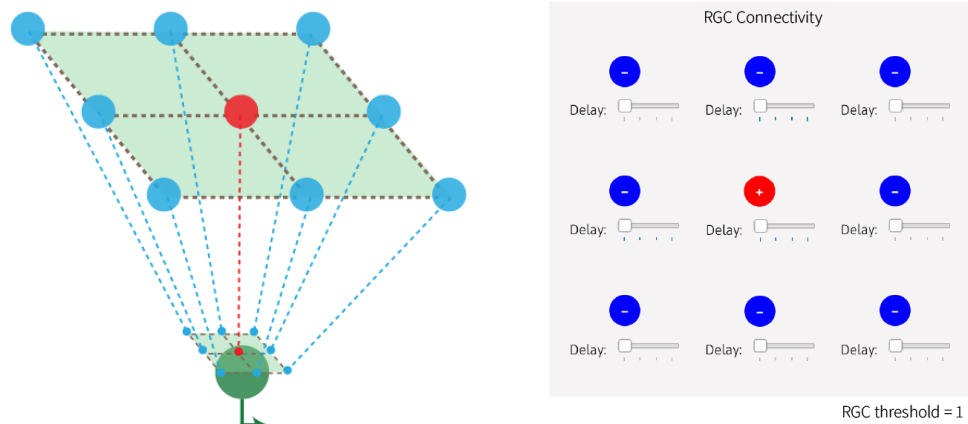


Lección 1, Actividad 2 – Solución alternativa: Entradas y conexiones a RGC2, cuyo campo receptivo se encuentra en el borde de la matriz (neurona de tipo centro-periferia con campo receptivo en el borde inferior)

Actividad #3: crear dos detectores de puntos con preferencias para puntos de diferentes tamaños

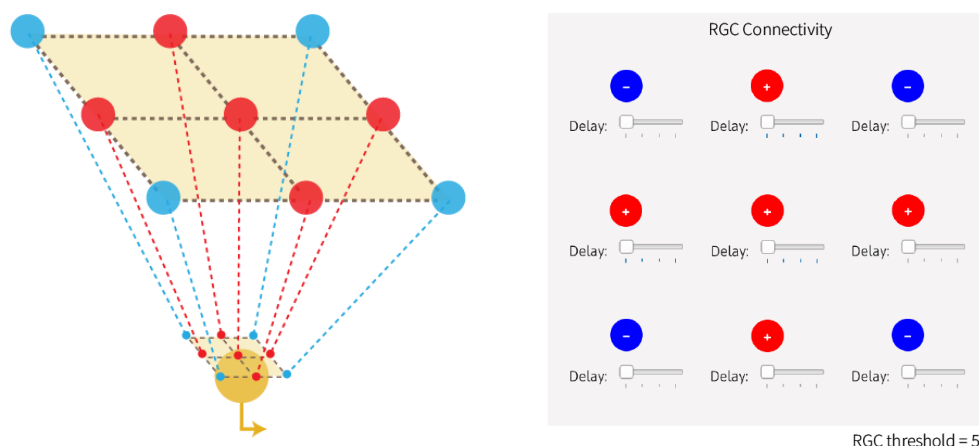
Entradas de RGC1 (detector de puntos pequeños): tal como se describe en la solución de la actividad n.º 1: el fotorreceptor central (rojo) es excitatorio (**polaridad positiva, +**), mientras que los demás fotorreceptores circundantes (azules) son inhibitorios (polaridad negativa, -). Establezca

el umbral de la célula ganglionar en 1. Esta célula ganglionar solo se activará en respuesta a un pequeño punto de luz que ilumine el fotorreceptor central.



Lección 1, Actividad 3 – Conexiones de RGC1: Entradas y conexiones de RGC1 (célula de centro-periferia pequeña con campo receptivo central)

Entradas de RGC2 (detector de puntos grandes): El fotorreceptor central (rojo) es excitatorio (polaridad positiva, +) y activa la célula ganglionar al detectar la luz. Sin embargo, los fotorreceptores circundantes más cercanos (arriba, abajo y a los lados) también son excitatorios (+). Los fotorreceptores de las esquinas (azules) son inhibitorios (polaridad negativa, -): suprimen la actividad de la célula ganglionar si el estímulo es demasiado intenso. Establezca el umbral de la célula ganglionar en 5. Esta célula ganglionar se activará en respuesta a una mancha de luz que ilumine el fotorreceptor central y los fotorreceptores circundantes laterales. No obstante, si la mancha de luz es demasiado grande y se ilumina algún fotorreceptor de esquina, esta inhibición adicional reducirá la excitación, y la célula ganglionar no alcanzará el umbral necesario para activarse.

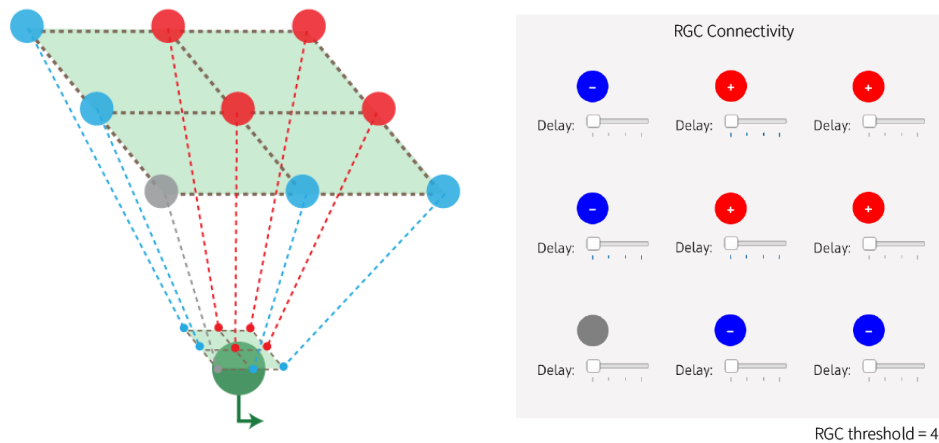


Lección 1, Actividad 3 – Conexiones de RGC2: Entradas y cableado a RGC2 (célula central-periférica más grande)

Desafío: Descifrar códigos con detectores de puntos

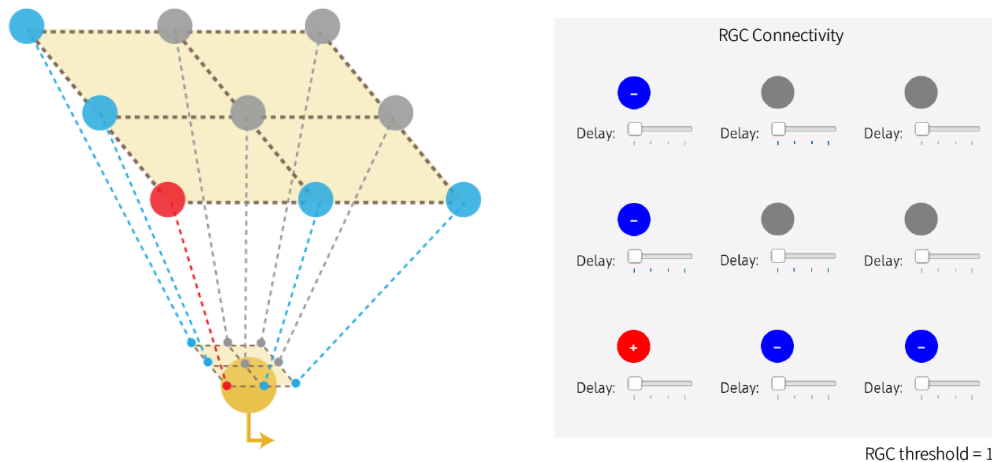
Desafío #1

Entradas de RGC1: Esta célula de tipo centro-periferia responde únicamente cuando se activan los cuatro fotorreceptores situados en la esquina superior derecha. Estos cuatro fotorreceptores deben tener polaridad positiva (rojo, excitatoria, +). Todos los demás fotorreceptores periféricos tienen polaridad negativa (azul, inhibitoria, -). El fotorreceptor de la esquina inferior izquierda no está conectado (gris), para que las células ganglionares RGC1 y RGC2 puedan activarse simultáneamente. El umbral de activación de la célula ganglionar se ha establecido en 4.



Lección 1, desafío 1: Entradas y conexiones de RGC1 (detector de puntos grandes con campo receptivo en la esquina superior derecha)

Entradas de RGC2: Esta célula centro-periférica solo responde cuando se activa el fotorreceptor situado en la esquina inferior izquierda. Este fotorreceptor debe tener polaridad positiva (rojo, excitatorio, +). Todos los demás fotorreceptores periféricos tienen polaridad negativa (azul, inhibitoria, -), excepto los cuatro superiores, que corresponden al centro del campo receptivo de la RGC1 (ver arriba), los cuales deben permanecer sin conexión (gris). Esto garantiza que RGC1 y RGC2 puedan activarse simultáneamente. El umbral de activación de la célula ganglionar se establece en 1.

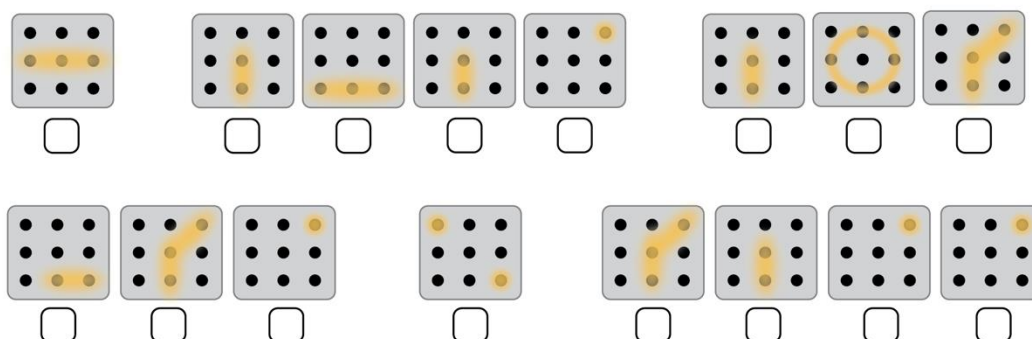


Lección 1, Desafío 1: Entradas y conexiones de RGC2 (detector de puntos pequeños con campo receptivo en la esquina inferior izquierda)

Mensaje secreto #1: **Dear reader, dread red area.** (Estimado lector, zona roja, ¡peligro!)

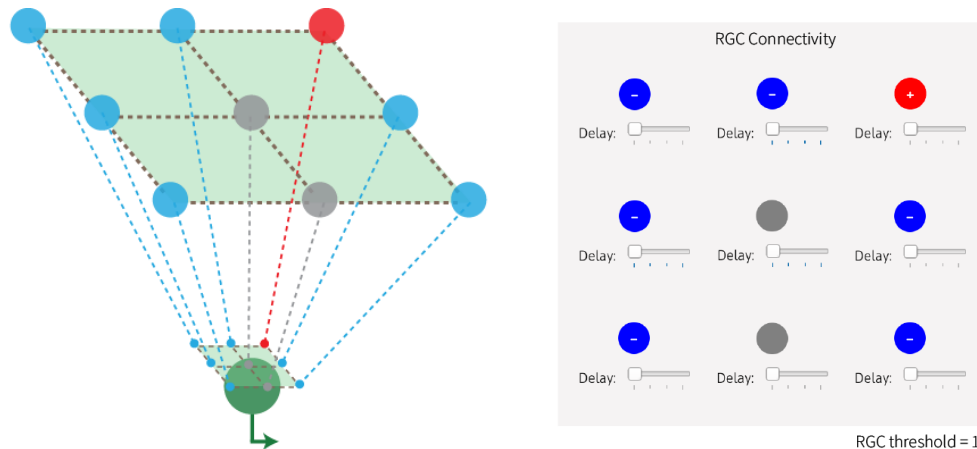
Problemas extra

Desafío #2



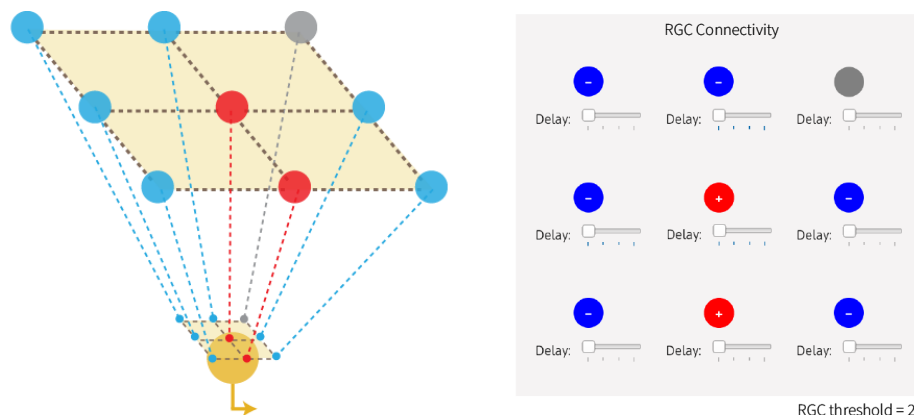
Cipher				
RGC1 Preferred visual stimulus		RGC2 Preferred visual stimulus		RetINaBox Output
0	0	=	A	
1	0	=	E	
0	1	=	R	
1	1	=	T	

Entradas de RGC1: Esta célula de centro-periferia solo responde cuando se activa el fotorreceptor situado en la esquina superior derecha. Este fotorreceptor debe tener polaridad positiva (rojo, excitatorio, +). Todos los demás fotorreceptores periféricos tienen polaridad negativa (azul, inhibitoria, -), excepto los fotorreceptores del centro y la parte inferior de la columna central, que permanecen inactivos (gris), para que las células ganglionares RGC1 y RGC2 puedan activarse simultáneamente. El umbral de activación de la célula ganglionar se establece en 1.



Lección 1, Desafío 2: Entradas y conexiones de RGC1 (detector de puntos con campo receptivo en la esquina superior derecha)

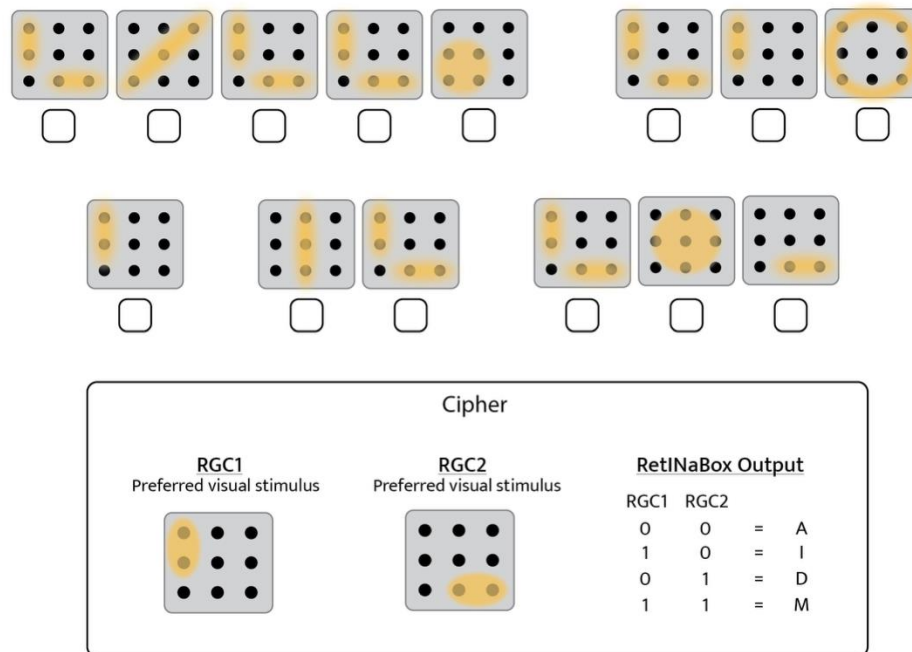
Entradas de RGC2: Esta célula es selectiva a un segmento de línea vertical corto situado en el centro de la matriz. Solo responde cuando se activan los dos fotorreceptores de la columna central inferior. Estos dos fotorreceptores deben tener polaridad positiva (rojo, excitatoria, +). Todos los demás fotorreceptores circundantes tienen polaridad negativa (azul, inhibitoria, -), excepto el fotorreceptor conectado al centro de la célula ganglionar RGC1, que debe permanecer inactivo. El umbral de activación de la célula ganglionar se establece en 2.



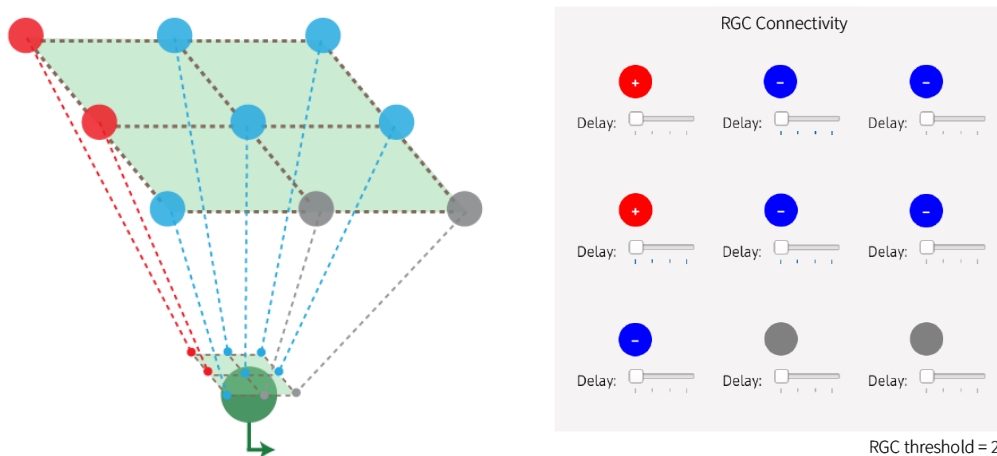
Lección 1, Desafío 2: Entradas y cableado de RGC2 (detector de segmentos de línea vertical)

Mensaje secreto #2: *A rare rat ate a tree.* (Una rata rara comió un árbol)

Desafío #3

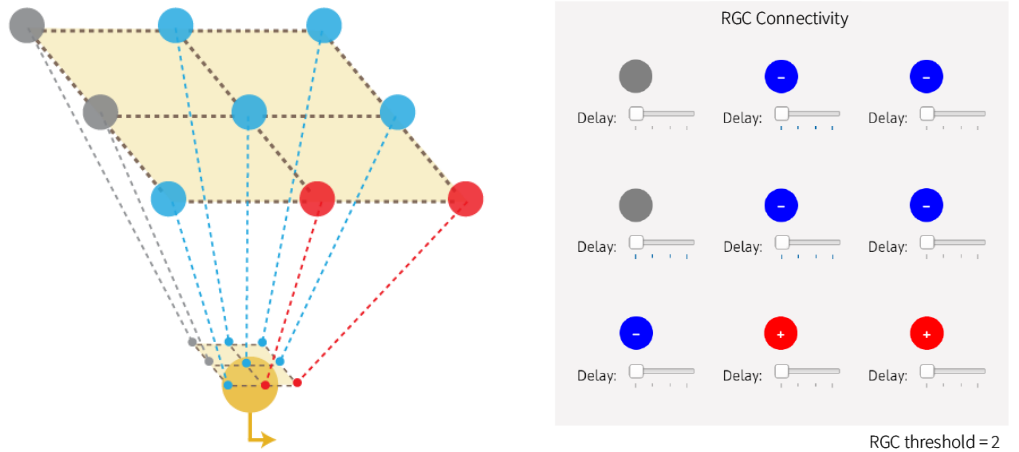


Entradas de RGC1: Esta célula es selectiva a un segmento de línea vertical corto situado en la esquina superior izquierda de la matriz. Solo responde cuando se activan los dos fotorreceptores de la columna superior izquierda. Estos dos fotorreceptores deben tener polaridad positiva (rojo, excitatoria, +). Todos los demás fotorreceptores circundantes tienen polaridad negativa (azul, inhibitoria, -), excepto los fotorreceptores central y derecho de la fila inferior, que permanecen inactivos (gris), para que las células ganglionares RGC1 y RGC2 puedan activarse simultáneamente. El umbral de activación de la célula ganglionar se ha establecido en 2.



Lección 1, Desafío 3: Entradas y cableado de RGC1 (detector de segmentos de línea vertical)

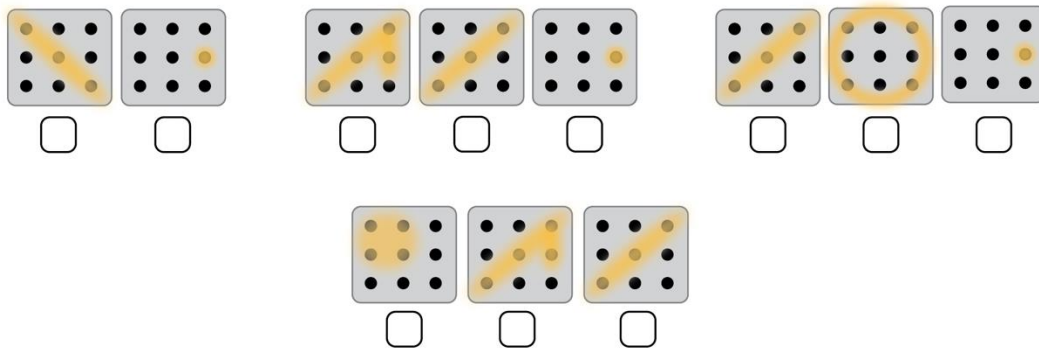
Entradas de RGC2: Esta célula es selectiva a un segmento de línea horizontal corto situado en la esquina inferior derecha de la matriz. Solo responde cuando se activan los dos fotorreceptores de la fila inferior derecha. Estos dos fotorreceptores deben tener polaridad positiva (rojo, excitatoria, +). Todos los demás fotorreceptores circundantes tienen polaridad negativa (azul, inhibitoria, -), excepto los fotorreceptores centrales y superiores de la columna izquierda, que permanecen inactivos (gris), para que las células ganglionares RGC1 y RGC2 puedan activarse simultáneamente. El umbral de activación de la célula ganglionar se establece en 2.



Lección 1, Desafío 3: Entradas y cableado de RGC2 (detector de segmentos de línea horizontal)

Mensaje secreto #3: **Mamma Mia! I am mad.** (Mamma Mia! Estoy molesto(a).)

Desafío #4



Cipher

RGC1

Preferred visual stimulus

RGC2

Preferred visual stimulus

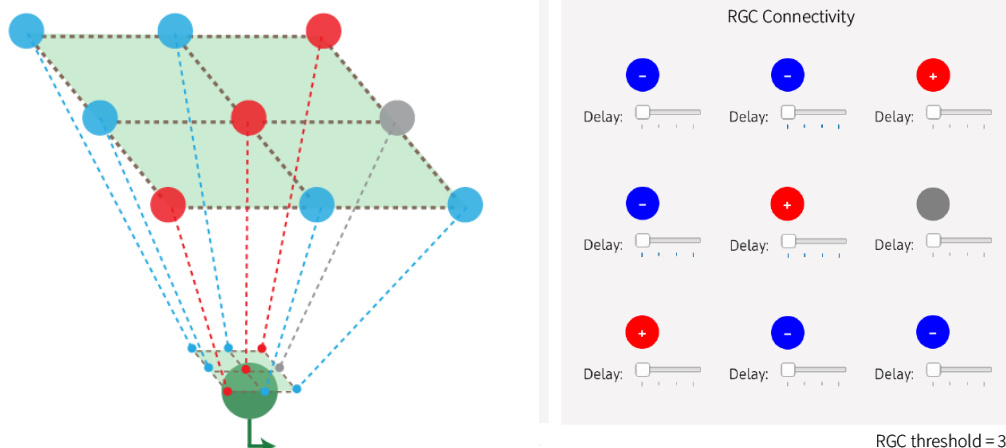
RetINaBox Output

RGC1

RGC2

0	0	=	H
1	0	=	T
0	1	=	E
1	1	=	A

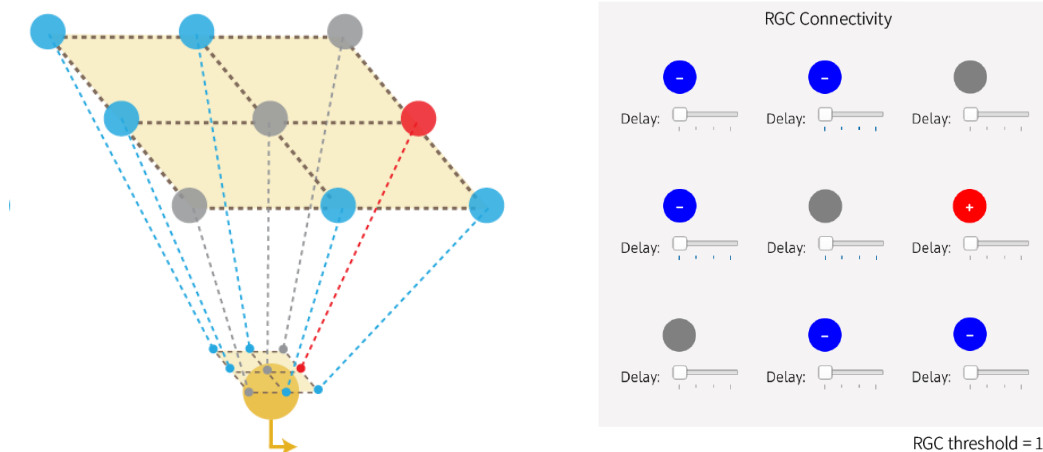
Entradas de RGC1: Esta célula selectiva a la orientación (presentada en la lección 2) es sensible a una línea diagonal de 45°. Responde únicamente cuando los tres fotorreceptores situados a lo largo de la diagonal de 45° están activados. Estos fotorreceptores deben tener polaridad positiva (rojo, excitatorio, +). Todos los demás fotorreceptores periféricos tienen polaridad negativa (azul, inhibitoria, -), excepto el fotorreceptor conectado al centro de la célula ganglionar RGC2, que debe permanecer inactivo. El umbral de activación de la célula ganglionar se establece en 3.



Lección 1, Desafío 4: Entradas y conexiones de RGC1 (célula selectiva de orientación).

Entradas de RGC2: Esta célula centro-periférica solo responde cuando se activa el fotorreceptor situado en la fila central y a la derecha. Este fotorreceptor debe tener polaridad positiva (rojo,

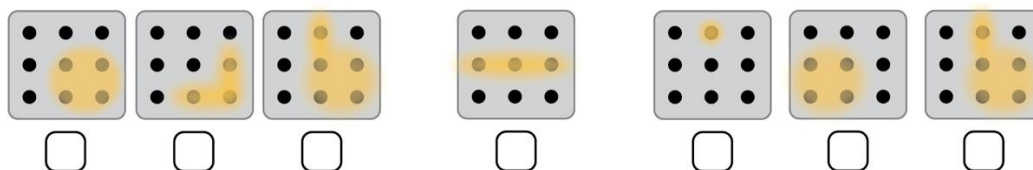
excitatorio, +). Todos los demás fotorreceptores periféricos tienen polaridad negativa (azul, inhibitoria, -), excepto los situados en la diagonal central (45°), que permanecen inactivos (gris), para que las células ganglionares RGC1 y RGC2 puedan activarse simultáneamente. El umbral de activación de la célula ganglionar se establece en 1.



Lección 1, Desafío 4: Entradas y conexiones de RGC2 (detector de puntos con campo receptivo en el lado derecho).

Mensaje secreto #4: **He ate the hat.** (Él comió el sombrero)

Desafío #5



Cipher

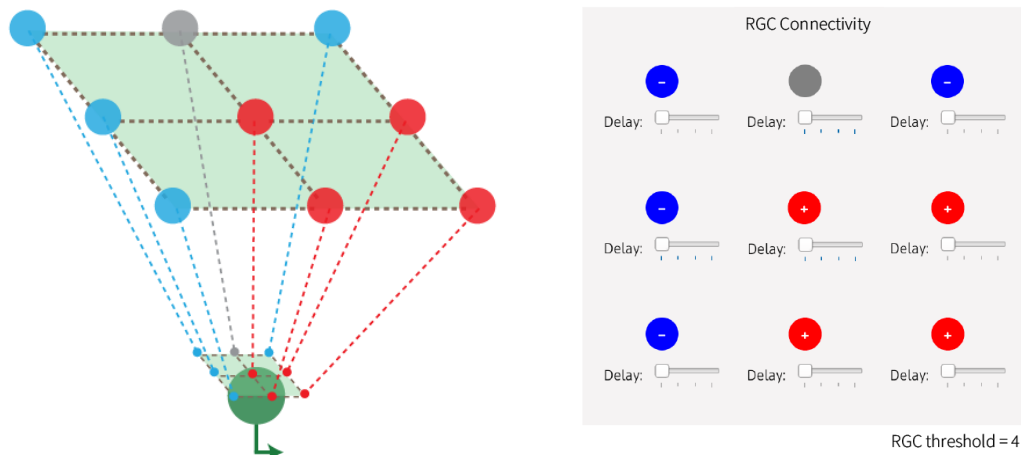
RGC1
Preferred visual stimulus

RGC2
Preferred visual stimulus

RetINaBox Output

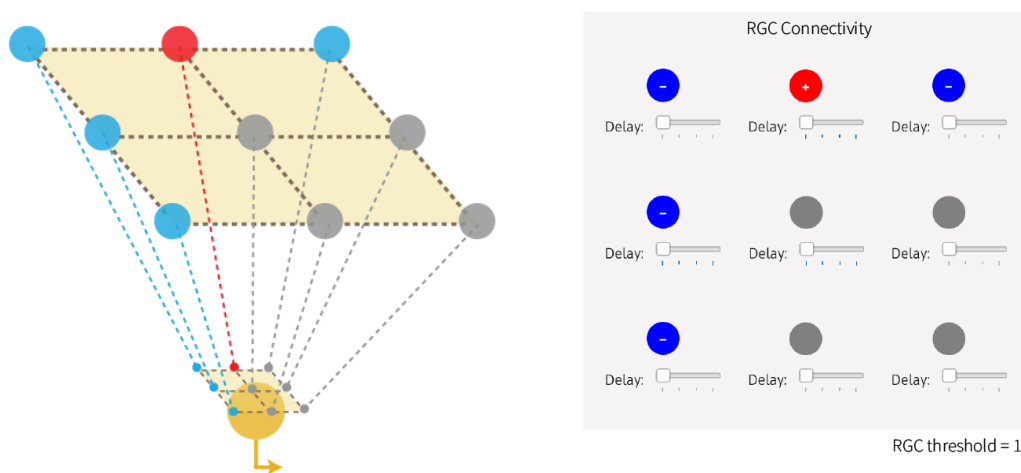
RGC1	RGC2	=	
0	0	=	A
1	0	=	B
0	1	=	C
1	1	=	KE

Entradas de RGC1: Esta célula centro-periférica solo responde cuando se activan los cuatro fotorreceptores situados en la esquina inferior derecha. Estos cuatro fotorreceptores deben tener polaridad positiva (rojo, excitatorio, +). El resto de los fotorreceptores periféricos tienen polaridad negativa (azul, inhibitoria, -), excepto el fotorreceptor conectado al centro de la célula ganglionar RGC2, que debe permanecer inactivo. El umbral de activación de la célula ganglionar se ha establecido en 4.



Lección 1, Desafío 5: Entradas y conexiones de cableado de RGC1 (detector de puntos más grande con campo receptivo en la esquina inferior derecha)

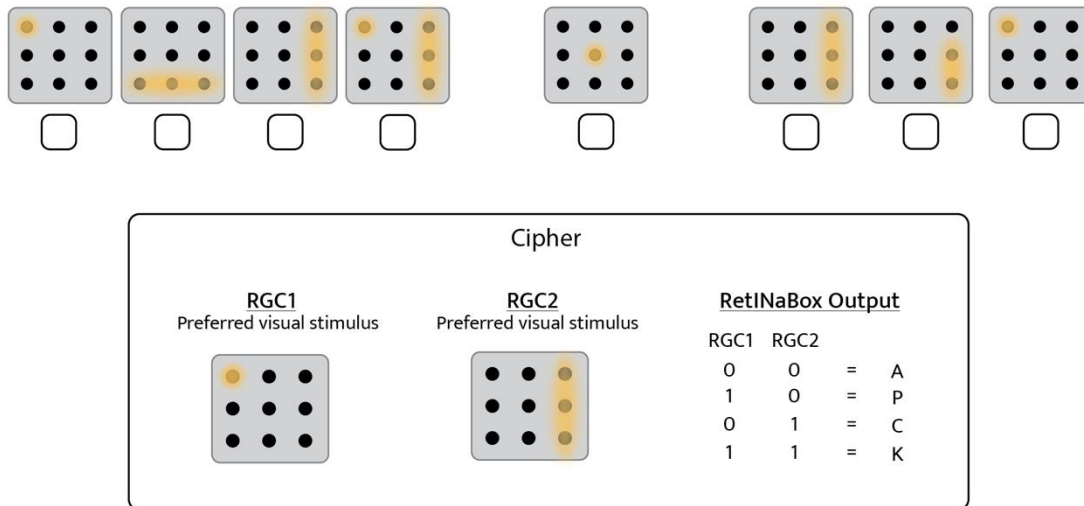
Entradas de RGC2: Esta célula centro-periférica solo responde cuando se activa el fotorreceptor central de la fila superior. Este fotorreceptor debe tener polaridad positiva (rojo, excitatorio, +). Todos los demás fotorreceptores periféricos tienen polaridad negativa (azul, inhibitoria, -), excepto los fotorreceptores conectados al centro de la célula ganglionar RGC1, que deben permanecer inactivos. El umbral de activación de la célula ganglionar se establece en 1.



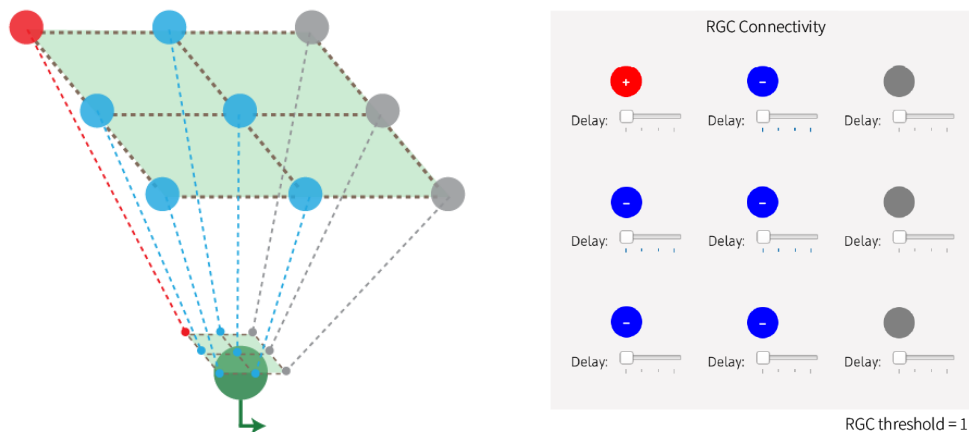
Lección 1, Desafío 5: Entradas y conexiones de RGC2 (detector de puntos con campo receptivo en la parte superior central)

Mensaje secreto #5: **Bake a cake.** (Cocinar un pastel)

Desafío #6



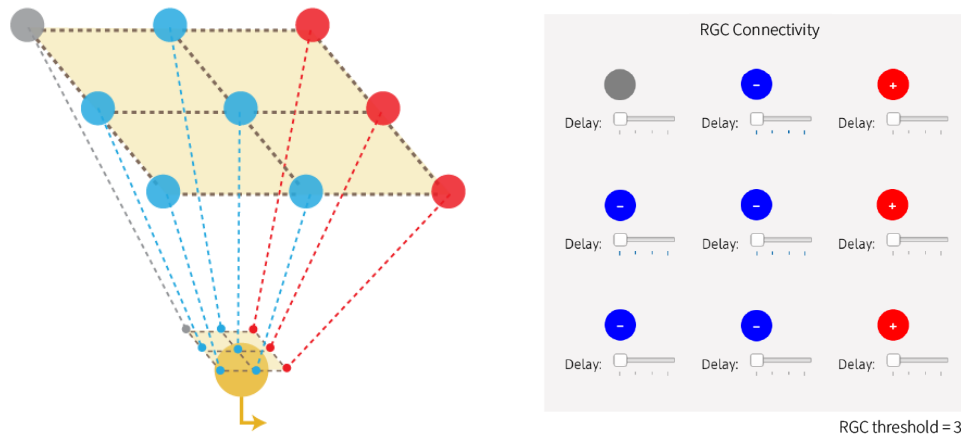
Entradas de RGC1: Esta célula centro-periférica solo responde cuando se activa el fotorreceptor situado en la esquina superior izquierda. Este fotorreceptor debe tener polaridad positiva (rojo, excitatorio, +). Todos los demás fotorreceptores periféricos tienen polaridad negativa (azul, inhibitoria, -), excepto los de la columna derecha, que permanecen inactivos (gris), para que las células ganglionares RGC1 y RGC2 puedan activarse simultáneamente. El umbral de activación de la célula ganglionar se establece en 1.



Lección 1, Desafío 6: Entradas y conexiones de RGC1 (detector de puntos con campo receptivo en la esquina superior izquierda)

Entradas de RGC2: Esta célula selectiva a la orientación (presentada en la lección 2) es sensible a una línea vertical situada en el lado derecho de la matriz de fotorreceptores. Solo responde

cuando los tres fotorreceptores de la columna derecha están activados. Estos fotorreceptores deben tener polaridad positiva (rojo, excitatorio, +). Todos los demás fotorreceptores circundantes tienen polaridad negativa (azul, inhibitoria, -), excepto los fotorreceptores conectados al centro de la célula ganglionar RGC2, que deben permanecer inactivos. El umbral de activación de la célula ganglionar se establece en 3.



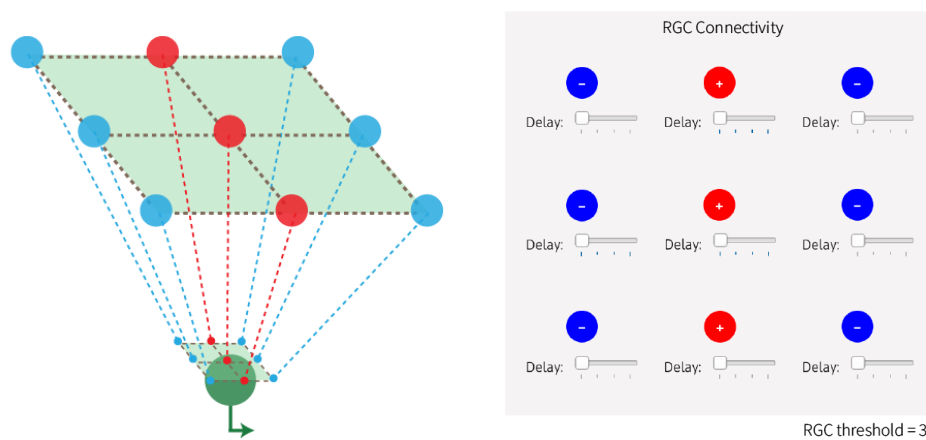
Lección 1, Desafío 6: Entradas y conexiones de RGC2 (célula selectiva de orientación)

Mensaje secreto #6: **Pack a cap.** (Empaca una gorra)

Soluciones de la lección 2: Selectividad de orientación

Actividad #1: crear una célula ganglionar que detecte una línea vertical

Entradas de RGC1: Conecta 3 fotorreceptores adyacentes en una línea vertical (por ejemplo, en la columna central) a la célula ganglionar, con polaridad positiva (excitatoria). Conecte los 6 fotorreceptores restantes a la misma célula ganglionar, pero con polaridad negativa (inhibitoria). Establezca el umbral de activación de la célula ganglionar en 3, de modo que solo se active cuando los 3 fotorreceptores estén activados.

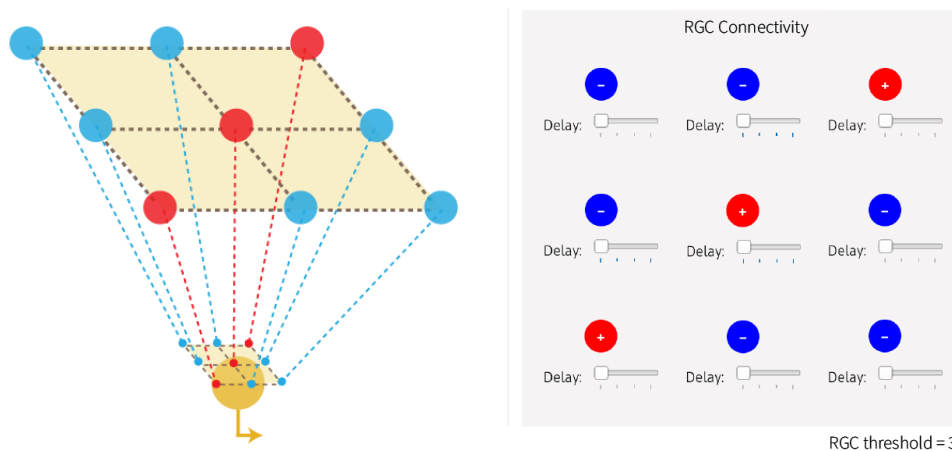


Lección 2, Actividad 1: Entradas y conexiones de RGC1 (célula selectiva de orientación vertical)

Ten en cuenta que el ejemplo anterior es solo uno de los tres posibles ejemplos de una solución correcta. También podrías haber seleccionado un campo receptivo vertical en la columna izquierda o derecha de la matriz 3x3.

Actividad #2: crear una segunda célula ganglionar que detecte una línea diagonal.

Entradas de RGC2: Conecta 3 fotorreceptores a lo largo de la diagonal de la célula ganglionar, con polaridad positiva (excitatoria +). Conecta los 6 fotorreceptores restantes (fuera de la diagonal) a la misma célula ganglionar, con polaridad negativa (inhibitoria, -). Establece el umbral de activación de la célula ganglionar en 3, de modo que solo se active cuando los 3 fotorreceptores de la diagonal estén activados, pero se inhiba si se activa alguno de los fotorreceptores fuera de la diagonal.

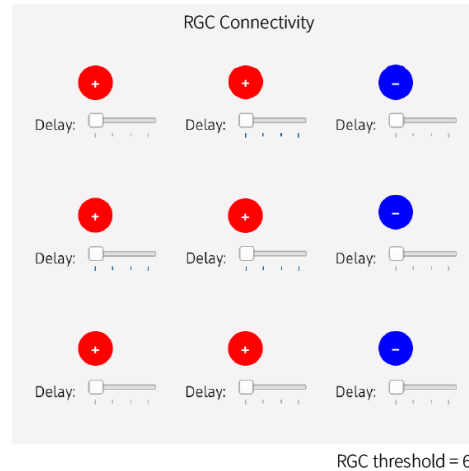
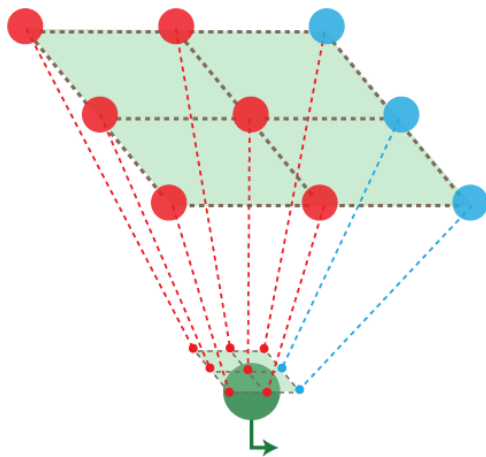


Lección 2, Actividad 2: Entradas y conexiones de RGC2 (célula selectiva de orientación diagonal)

Ten en cuenta que lo anterior representa solo uno de los dos posibles ejemplos de una solución correcta. También podrías haber seleccionado un campo receptivo diagonal orientado a 135° (es decir, la otra diagonal).

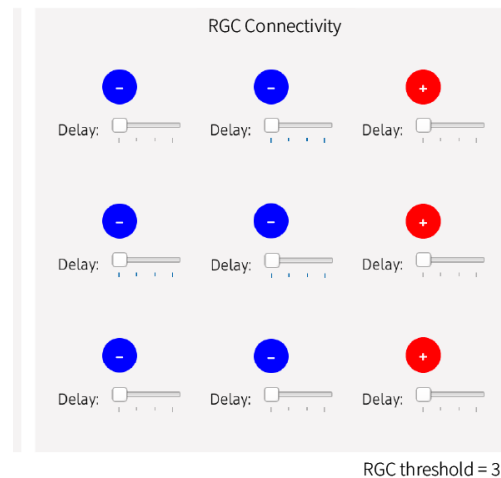
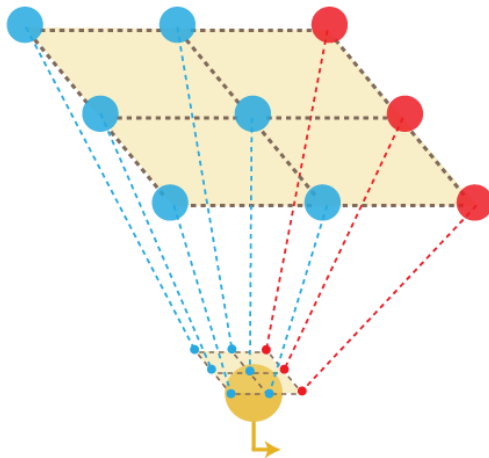
Actividad #3: crear dos células ganglionares que detecten líneas verticales de diferentes grosores

Entradas a RGC1: Conecta dos columnas adyacentes de 3 fotorreceptores en línea vertical (por ejemplo, la columna central y la lateral) a la célula ganglionar 1, con polaridad positiva (excitatoria). Conecta los 3 fotorreceptores restantes a la misma célula ganglionar, pero con polaridad negativa (inhibitoria). Establece el umbral de activación de la célula ganglionar en 6, de modo que solo se active cuando los 6 fotorreceptores estén activados.



Lección 2, Actividad 3: Entradas y conexiones de RGC1 (célula selectiva de orientación vertical gruesa)

Entradas a RGC2: Conecta una columna de 3 fotorreceptores en línea vertical (por ejemplo, la columna de la derecha) a la célula ganglionar 2, con polaridad positiva (excitatoria). Conecta los 6 fotorreceptores restantes a la misma célula ganglionar, pero con polaridad negativa (inhibitoria). Establece el umbral de activación de la célula ganglionar en 3, de modo que solo se active cuando los 3 fotorreceptores estén activados.



Lección 2, Actividad 3: Entradas y conexiones de RGC2 (célula selectiva de orientación vertical fina)

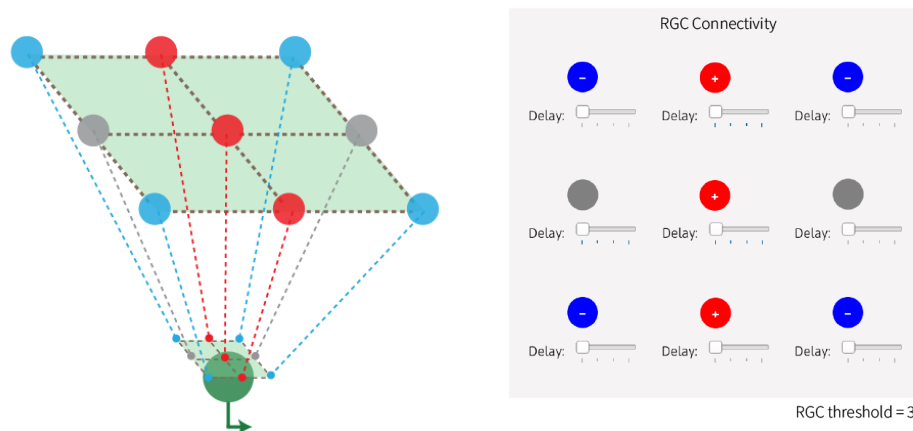
Ten en cuenta que lo anterior representa solo uno de los posibles ejemplos de una solución correcta. Podrías haber configurado cada célula ganglionar con un campo receptivo vertical en diferentes ubicaciones (es decir, desplazado hacia la izquierda o hacia la derecha).

Desafío #1: crear un detector de formas con campos receptivos selectivos a la orientación

Ten en cuenta que la solución que se muestra a continuación es solo una de las posibles soluciones correctas. Podrías haber elegido cualquier forma geométrica compuesta por dos líneas rectas de cualquier orientación (por ejemplo, una X, una T o una L, en cualquier orientación). La solución que se presenta a continuación configura un detector de formas que reconoce la forma de una «X».

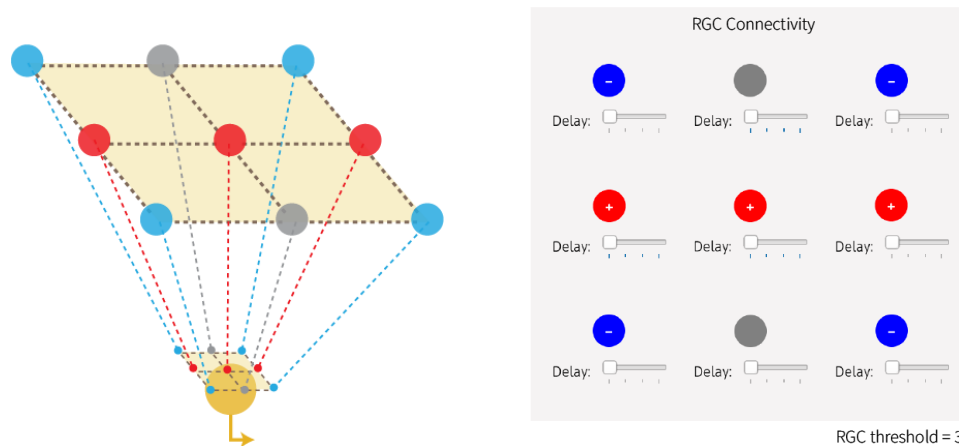
Cada una de las células ganglionares debería responder a una línea con una posición/orientación diferente. Ambas deberían activarse cuando se presenta la forma (es decir, ninguna de las células ganglionares debe desactivarse cuando la otra está activa).

Entradas de RGC1: Para crear una forma de cruz, queremos que la célula ganglionar 1 responda a una línea vertical en el centro de la matriz de fotorreceptores. Conecte 3 fotorreceptores adyacentes (por ejemplo, una línea vertical) a una célula ganglionar con polaridad positiva (excitatoria +), de modo que solo se active cuando los 3 fotorreceptores estén activados (es decir, cuando una franja de luz vertical esté presente en el centro de la matriz). Las células en las esquinas de la matriz deben tener polaridad negativa (inhibitoria -), mientras que las dos células de la fila central (izquierda y derecha) deben estar inactivas (gris). Esto permitirá que la célula sea selectiva a la orientación, pero también que siga respondiendo cuando se active la célula ganglionar 2 (ver debajo).



Lección 2, Desafío 1: Entradas y conexiones de RGC1 (célula selectiva de orientación vertical)

Entradas de RGC2: Para crear una forma de cruz, queremos que la célula ganglionar 2 sea sensible a una línea horizontal en el centro de la matriz de fotorreceptores. Conecte tres fotorreceptores adyacentes (por ejemplo, una línea horizontal) a la segunda célula ganglionar con polaridad positiva (excitatoria +), de modo que solo se active cuando los tres fotorreceptores estén activados (es decir, cuando una franja de luz horizontal esté presente en el centro de la matriz). De manera similar, al añadir inhibición a las conexiones de los fotorreceptores en las esquinas (polaridad negativa -), mientras se desactivan las células superior e inferior de la columna central, la célula se volverá selectiva a la orientación, pero seguirá respondiendo cuando la célula ganglionar 1 esté activa.



Lección 2, Desafío 1: Entradas y conexiones de RGC2 (célula selectiva de orientación horizontal)

Soluciones de la lección 3: Selectividad direccional

Nota: Dependiendo de los tiempos de retardo que hayas asignado a cada fotorreceptor, podría ser necesario probar diferentes velocidades de estímulo para observar la activación de la célula ganglionar en una dirección específica. El circuito funcionará de forma óptima cuando la velocidad de movimiento se ajuste a los tiempos de retardo, lo que permite que todas las señales de la dirección preferida se sumen simultáneamente en la célula ganglionar durante el movimiento en esa dirección, y que la inhibición en la dirección opuesta anule eficazmente la excitación durante el movimiento en esa dirección.

Actividad#1: crear una célula ganglionar selectiva a la dirección de movimiento hacia la izquierda ←

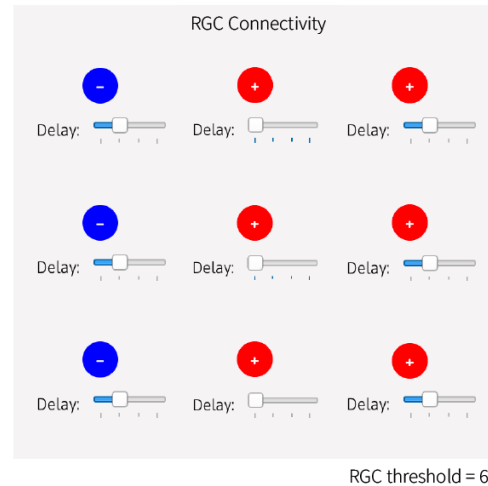
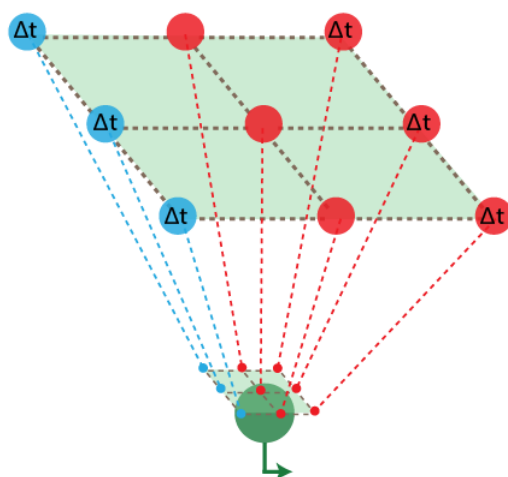
La célula ganglionar recibe información de dos columnas completas de fotorreceptores excitatorios (polaridad positiva) y una columna completa de fotorreceptores inhibitorios (polaridad negativa).

- Columna de fotorreceptores de la izquierda (inhibitoria, -): Retardo temporal corto/medio
- Columna de fotorreceptores central (excitatoria, +): Sin retardo temporal
- Columna de fotorreceptores de la derecha (excitatoria, +): Retardo temporal corto/medio

Establece el **umbral de activación de la célula ganglionar en 6**. Esto garantiza que la célula solo se activará cuando ambas columnas de fotorreceptores excitatorios (6 fotorreceptores en total) se activen de forma simultánea, es decir, cuando el movimiento se dirija hacia la izquierda y el tiempo de activación sea el adecuado para la suma de las señales.

Esta configuración hace que la célula ganglionar solo se active cuando un estímulo se mueve de izquierda a derecha a través de la matriz. El estímulo activa secuencialmente los fotorreceptores de la columna más a la derecha, la central y, finalmente, la de la izquierda. Los retrasos están configurados de tal manera que las señales de las dos columnas excitadoras llegan a la célula ganglionar simultáneamente **solo** durante el movimiento de izquierda a derecha, lo que permite que la célula alcance el umbral y se active. La entrada de la columna inhibitoria, al estar retrasada,

llega demasiado tarde como para interferir con la respuesta de la célula ganglionar. Si el estímulo se mueve de derecha a izquierda (es decir, en dirección opuesta a la dirección preferida de la célula ganglionar), la columna inhibitoria se suma a la excitadora, anulando la excitación e impidiendo que la célula ganglionar se active. Además, las dos columnas de entradas excitadoras se activan desfasadas entre sí durante el movimiento de derecha a izquierda. **Nota: si se estimulan solo los 6 fotorreceptores conectados positivamente (sin estimular los 3 conectados negativamente) con un estímulo estático, la célula ganglionar también se activará (similar a lo que ocurre con muchas células ganglionares selectivas de dirección en el cerebro, que a veces pueden activarse tanto por estímulos en movimiento como por estímulos estáticos).*



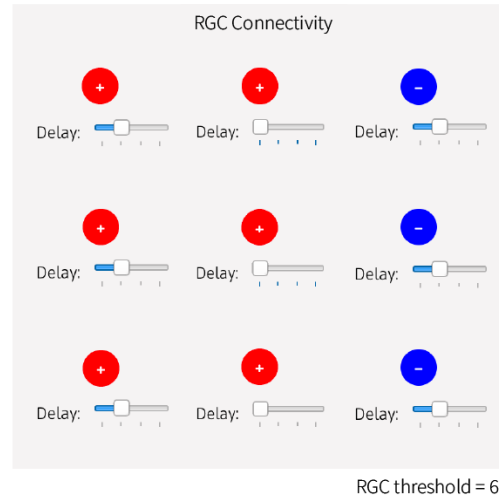
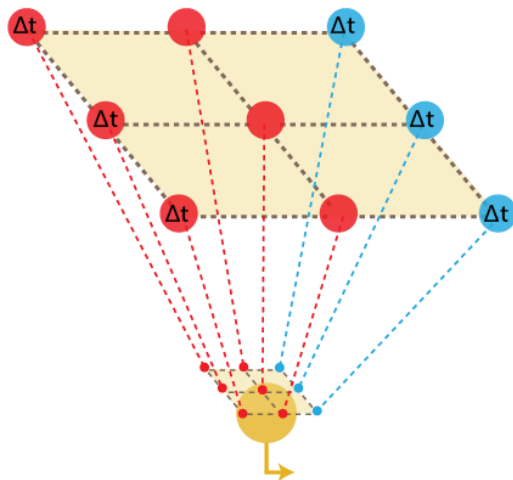
Lección 3, Actividad 1: Entradas y conexiones de RG1 (célula selectiva de dirección de movimiento hacia la izquierda)

Actividad #2: crear una célula ganglionar selectiva a la dirección de movimiento hacia la derecha →

La célula ganglionar recibe señales de dos columnas completas de fotorreceptores excitatorios (polaridad positiva) y una columna completa de fotorreceptores inhibitorios (polaridad negativa).

- Columna de fotorreceptores de la izquierda (excitatoria, +): Retardo de tiempo corto/medio
- Columna de fotorreceptores central (excitatoria, +): Sin retardo de tiempo
- Columna de fotorreceptores de la derecha (inhibitoria, -): Retardo de tiempo corto/medio

Establece el **umbral de la célula ganglionar en 6**. Esto garantiza que la célula solo se active cuando las dos columnas de fotorreceptores excitatorios (6 fotorreceptores en total) se activen simultáneamente, es decir, cuando el movimiento sea hacia la derecha y la sincronización de las señales sea perfecta para la suma de las entradas. Consulta la solución de la *Actividad 1* para una explicación detallada de la suma de señales sincronizadas.



Lección 3, Actividad 2: Entradas y conexiones de RGC2 (célula selectiva de dirección de movimiento hacia la derecha)

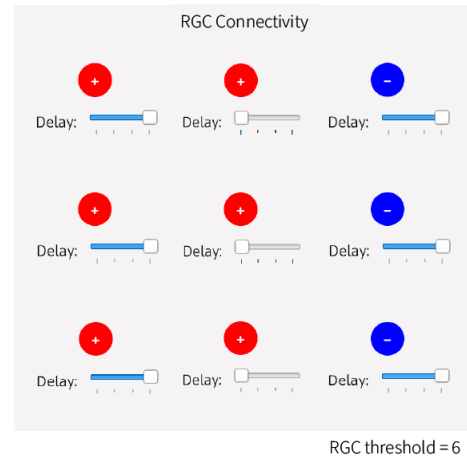
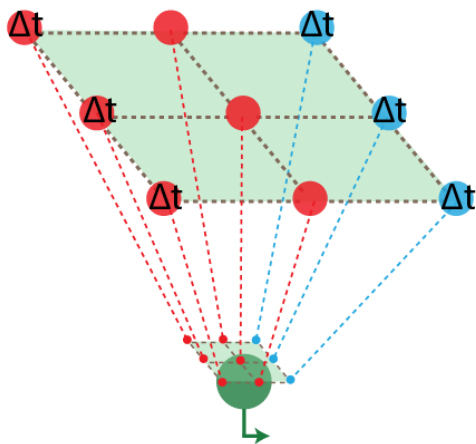
Actividad #3: crear una neurona ganglionar selectiva de dirección que prefiera movimientos lentos en vez de movimientos rápidos →

La clave para solucionar este problema radica en la **magnitud de los retardo de tiempo** que se imponen a los circuitos descritos en la Actividad #1 (célula selectiva de dirección derecha).

Cada célula ganglionar recibe señales de dos columnas completas de fotorreceptores excitatorios (de polaridad positiva) y una columna completa de fotorreceptores inhibitorios (de polaridad negativa). Establezca el **umbral de activación de cada célula ganglionar en 6**. Esto garantiza que la célula solo se activará cuando ambas columnas de fotorreceptores excitatorios (6 fotorreceptores en total) se activen simultáneamente.

Entradas de RGC1 (neurona de movimiento lento → selectiva a la dirección):

- Columna de fotorreceptores de la izquierda (excitatoria, +): retardo temporal prolongado
- Columna de fotorreceptores central (excitatoria, +): sin retardo temporal
- Columna de fotorreceptores de la derecha (inhibitoria, -): retardo temporal prolongado

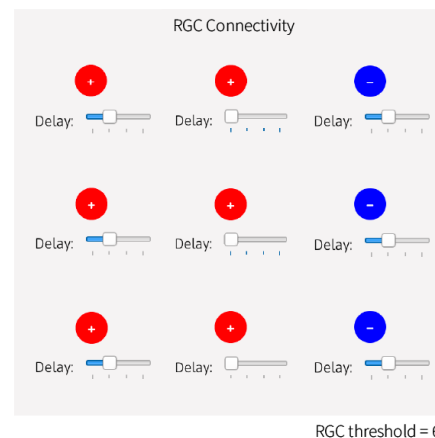
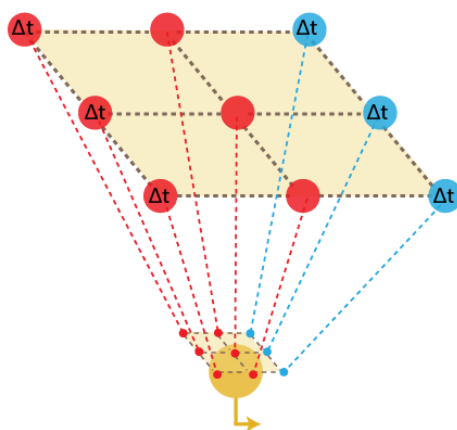


Lección 3, Actividad 3: Entradas y conexiones de RGC1 (célula selectiva de dirección de movimiento lento hacia la derecha)

Entradas de RGC2 (fast-moving → directions-selective cell):

- Columna de fotorreceptores de la izquierda (excitatoria, +): pequeño retardo temporal
- Columna de fotorreceptores central (excitatoria, +): sin retardo temporal
- Columna de fotorreceptores de la derecha (inhibitoria, -): pequeño retardo temporal

Un menor tiempo de retardo reduce el intervalo de tiempo disponible para la suma de las señales de entrada, por lo que el estímulo debe moverse más rápidamente para activar la célula ganglionar. Por el contrario, un mayor tiempo de retardo amplía este intervalo, permitiendo que la célula responda a movimientos más lentos. Para una explicación más detallada sobre la suma de señales de entrada sincronizadas en el tiempo, consulte la solución de la Actividad # 1.

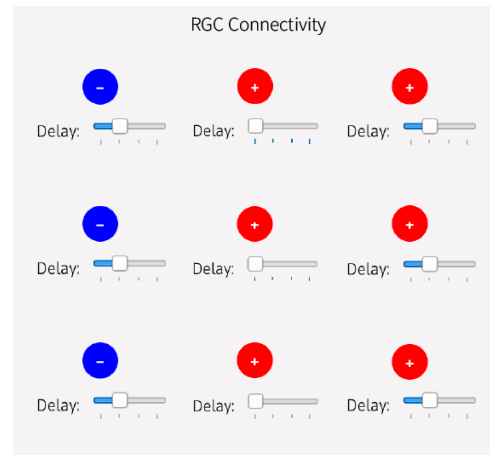
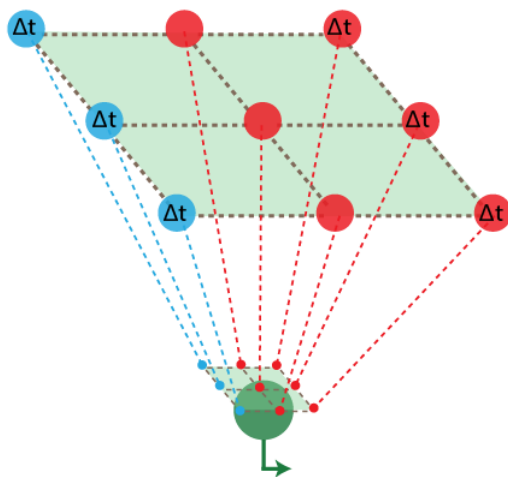


Lección 3, Actividad 3: Entradas y conexiones de RGC2 (célula selectiva de dirección de movimiento rápido hacia la derecha)

Desafío: Destrucción de bloques mediante circuitos con selección de dirección

Entradas de RGC1 \leftarrow : la célula ganglionar recibe señales de dos columnas completas de fotorreceptores excitatorios (polaridad positiva) y una columna completa de fotorreceptores inhibitorios (polaridad negativa). Establece el **umbral de la célula ganglionar en 6**.

- Columna de fotorreceptores de la izquierda (inhibitoria, -): pequeño retardo de tiempo
- Columna de fotorreceptores central (excitatoria, +): sin retardo de tiempo
- Columna de fotorreceptores de la derecha (excitatoria, +): pequeño retardo de tiempo

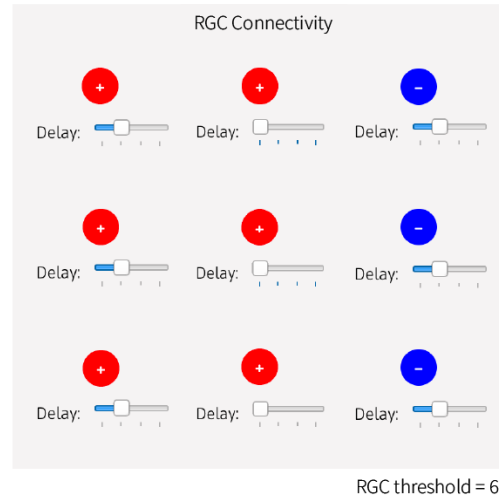
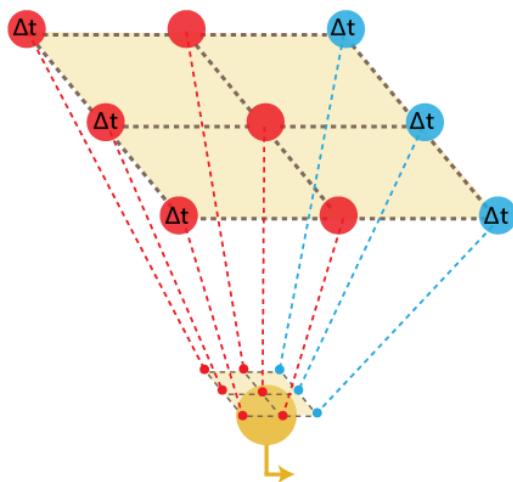


RGC threshold = 6

Lección 3, Desafío 1: Entradas y conexiones de RGC1 (célula selectiva de dirección de movimiento hacia la izquierda)

Entradas de RGC2 \rightarrow : la célula ganglionar recibe señales de dos columnas completas de fotorreceptores excitatorios (polaridad positiva) y una columna completa de fotorreceptores inhibitorios (polaridad negativa). Establece el **umbral de la célula ganglionar en 6**.

- Columna de fotorreceptores de la izquierda (excitatoria, +): pequeño retardo de tiempo
- Columna de fotorreceptores central (excitatoria, +): Sin retardo de tiempo
- Columna de fotorreceptores de la derecha (inhibitoria, -): pequeño retardo de tiempo



Lección 3, Actividad 4: Entradas y conexiones de RGC2 (célula selectiva de dirección del movimiento hacia la derecha)

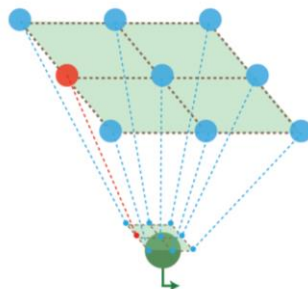
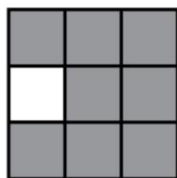
Modo Descubrimiento

Fácil

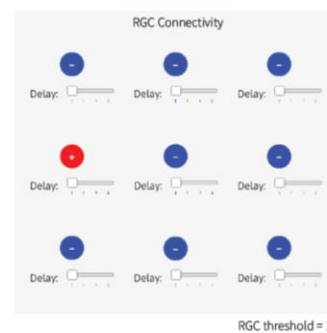
Fácil 1: Célula centro-periférica

- Estímulo preferido: punto de luz estático en el borde izquierdo del campo receptivo
- Umbral de la célula ganglionar: 1

Preferred stimulus



Circuit



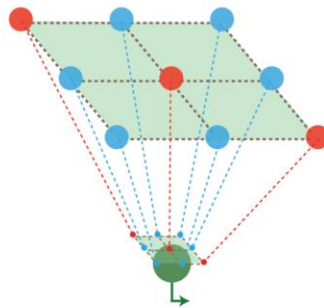
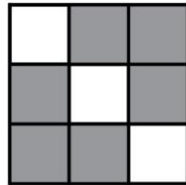
Lección 4, Fácil 1: Estímulo preferido (izquierda) y esquema de conexión (derecha) para el circuito misterioso de nivel fácil 1

Fácil 2: Célula selectiva de orientación

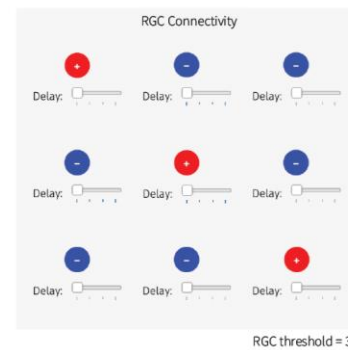
- Estímulo preferido: línea diagonal estática (135°) en el centro del campo receptivo

- Umbral de la célula ganglionar: 3

Preferred stimulus



Circuit

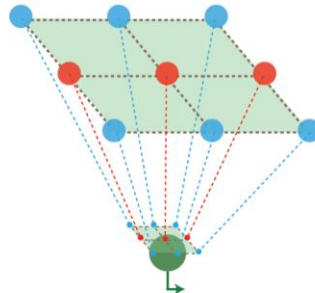
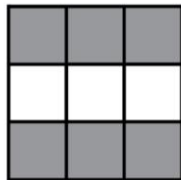


Lección 4, Fácil 2: Estímulo preferido (izquierda) y esquema de conexión (derecha) para el circuito misterioso de nivel fácil 2

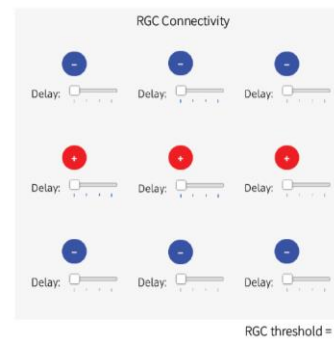
Fácil 3: Célula selectiva de orientación

- Estímulo preferido: línea horizontal estática en el centro del campo
- Umbral de la célula ganglionar: 3

Preferred stimulus



Circuit

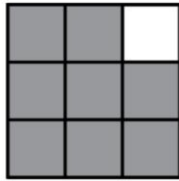


Lección 4, Fácil 3: Estímulo preferido (izquierda) y esquema de conexión (derecha) para el circuito misterioso de nivel fácil 3

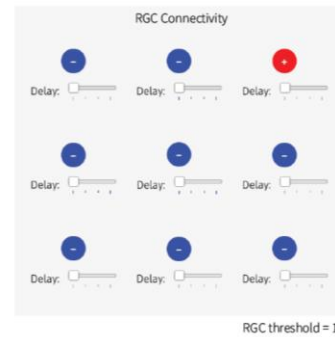
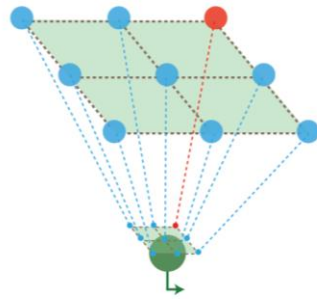
Fácil 4: Célula centro-periférica

- Estímulo preferido: punto de luz estático en la esquina superior derecha del campo receptivo
- Umbral de la célula ganglionar: 1

Preferred stimulus



Circuit

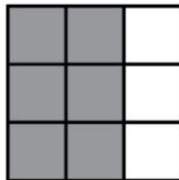


Lección 4, Fácil 4: Estímulo preferido (izquierda) y esquema de conexión (derecha) para el circuito misterioso de nivel fácil 4

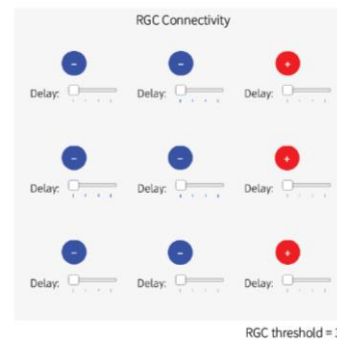
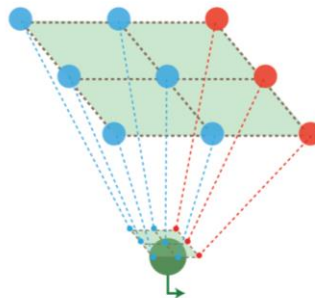
Fácil 5: Célula selectiva de orientación

- Estímulo preferido: línea vertical estática en el borde derecho del campo receptivo
- Umbral de la célula ganglionar: 3

Preferred stimulus



Circuit

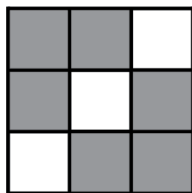


Lección 4, Fácil 5: Estímulo preferido (izquierda) y esquema de conexión (derecha) para el circuito misterioso de nivel fácil 5

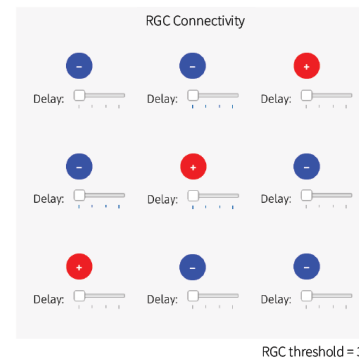
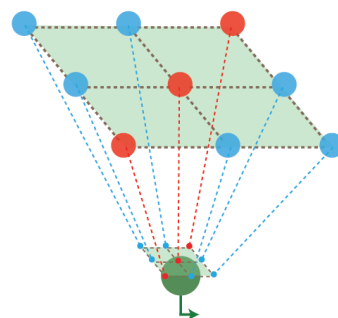
Fácil 6: Célula selectiva de orientación

- Estímulo preferido: línea diagonal estática (45°) en el centro del campo receptivo
- Umbral de la célula ganglionar: 3

Preferred stimulus



Circuit

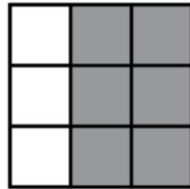


Lección 4, Fácil 6: Estímulo preferido (izquierda) y esquema de conexión (derecha) para el circuito misterioso de nivel fácil 6

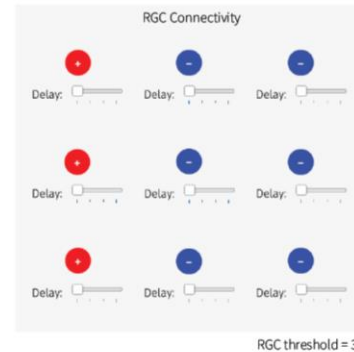
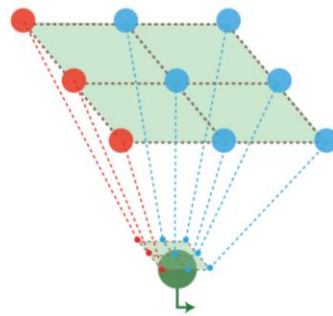
Fácil 7: Célula selectiva de orientación

- Estímulo preferido: línea vertical estática en el borde izquierdo del campo receptivo
- Umbral de la célula ganglionar: 3

Preferred stimulus



Circuit



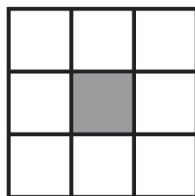
Lección 4, Fácil 7: Estímulo preferido (izquierda) y esquema de conexión (derecha) para el circuito misterioso de nivel fácil 7

Intermedio

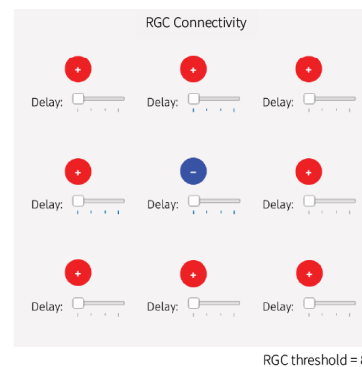
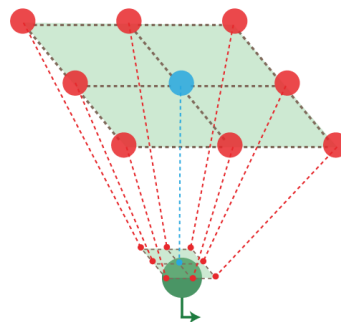
Intermedio 1: Célula selectiva a un anillo

- Estímulo preferido: anillo de luz (sin luz en el centro del campo receptivo)
- Umbral de la célula ganglionar: 8

Preferred stimulus



Circuit

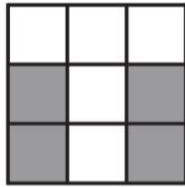


Lección 4, Intermedio 1: Estímulo preferido (izquierda) y esquema de conexión (derecha) para el circuito misterioso de nivel intermedio 1

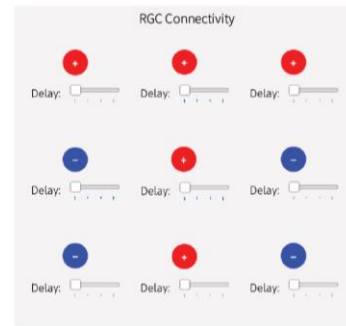
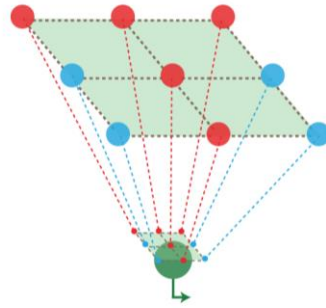
Intermedio 2: Célula selectiva a la forma de una T

- Estímulo preferido: forma de T
- Umbral de la célula ganglionar: 5

Preferred stimulus



Circuit



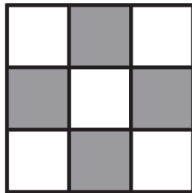
RGC threshold = 5

Lección 4, Intermedio 2: Estímulo preferido (izquierda) y esquema de conexión (derecha) para el circuito misterioso de nivel intermedio 2

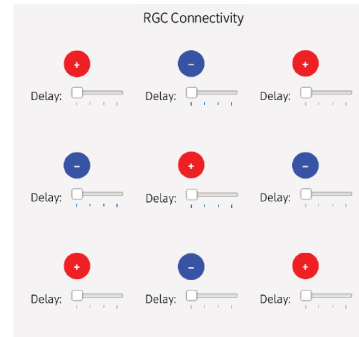
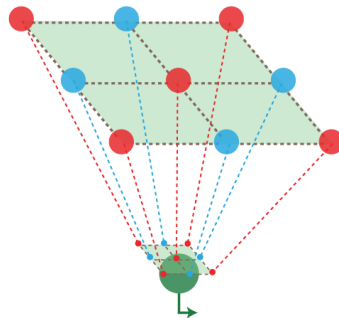
Intermedio 3: Célula selectiva a la forma de una X

- Estímulo preferido: forma de X en el centro del campo receptivo
- Umbral de la célula ganglionar: 5

Preferred stimulus



Circuit



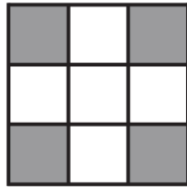
RGC threshold = 5

Lección 4, Intermedio 3: Estímulo preferido (izquierda) y esquema de conexión (derecha) para el circuito misterioso de nivel intermedio 3

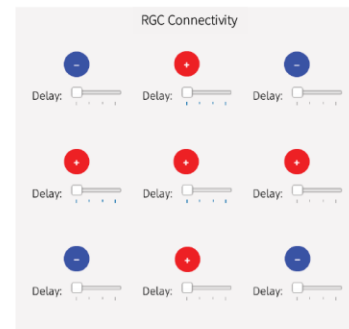
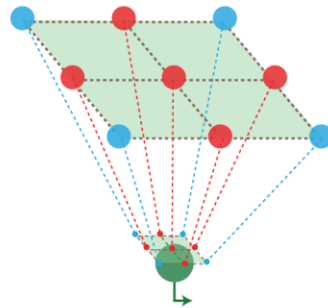
Intermedio 4: Célula selectiva a la forma de un +

- Estímulo preferido: forma de + (o una mancha de luz de tamaño mediano) en el centro del campo receptivo
- Umbral de la célula ganglionar: 5

Preferred stimulus



Circuit



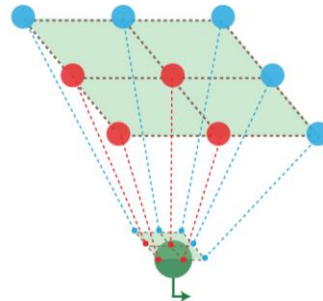
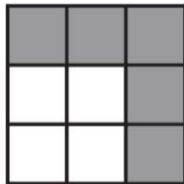
RGC threshold = 5

Lección 4, Intermedio 4: Estímulo preferido (izquierda) y esquema de conexión (derecha) para el circuito misterioso de nivel intermedio 4

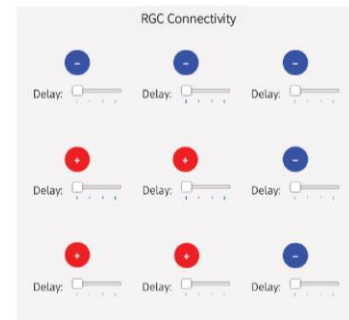
Intermedio 5: Célula centro-periferia

- Estímulo preferido: mancha de luz de tamaño mediano con campo receptivo en la esquina inferior izquierda
- Umbral de la célula ganglionar: 4

Preferred stimulus



Circuit



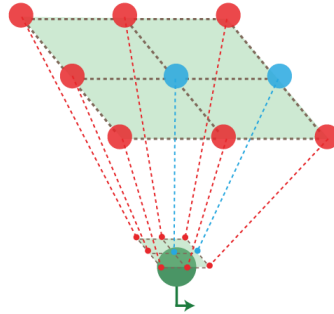
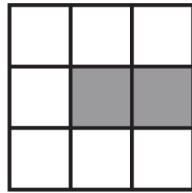
RGC threshold = 4

Lección 4, Intermedio 5: Estímulo preferido (izquierda) y esquema de conexión (derecha) para el circuito misterioso de nivel intermedio 5

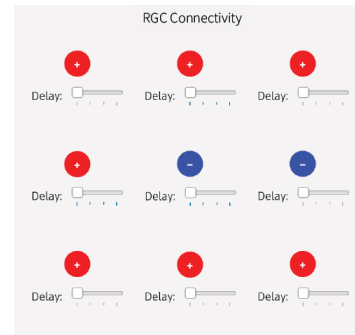
Intermedio 6: Célula selectiva a la forma de una C

- Estímulo preferido: forma de C
- Umbral de la célula ganglionar: 7

Preferred stimulus



Circuit



RGC threshold = 7

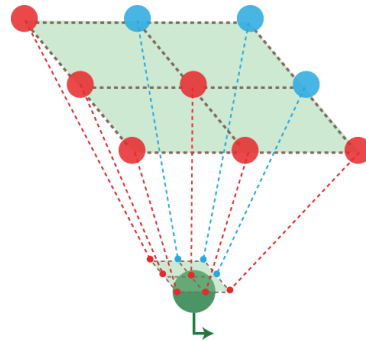
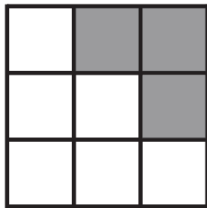
Lección 4, Intermedio 6: Estímulo preferido (izquierda) y esquema de conexión (derecha) para el circuito misterioso de nivel intermedio 6

Difícil

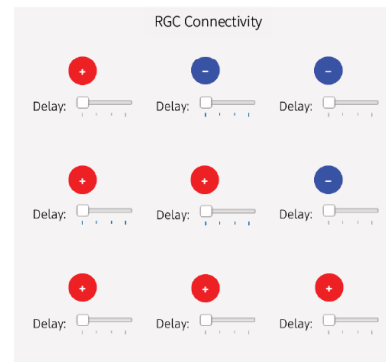
Difícil 1: Célula con selección de forma (triángulo)

- Estímulo preferido: ángulo recto en la esquina inferior izquierda del campo receptivo
- Umbral de la célula ganglionar: 6

Preferred stimulus



Circuit



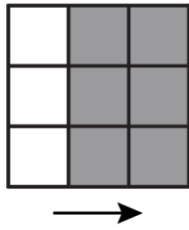
RGC threshold = 6

Lección 4, Difícil 1: Estímulo preferido (izquierda) y esquema de conexión (derecha) para el circuito misterioso de nivel difícil 1

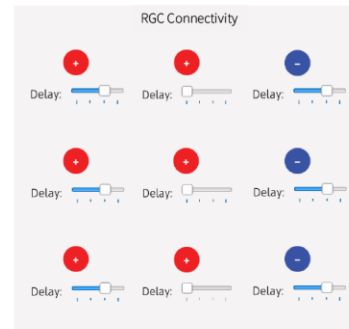
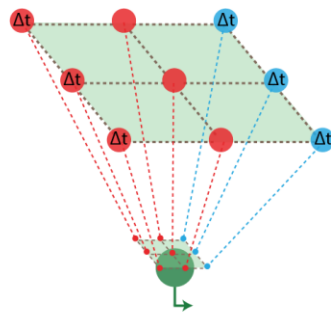
Difícil 2: Célula selectiva de dirección

- Estímulo preferido: Barra vertical de luz que se mueve hacia la derecha
- Los fotorreceptores de las columnas izquierda y derecha deben configurarse con un retardo de tiempo medio (para una explicación detallada sobre la suma de señales de entrada sincronizadas en el tiempo, consulte la lección 3, actividad 1).
- Umbral de la célula ganglionar: 6

Preferred stimulus



Circuit



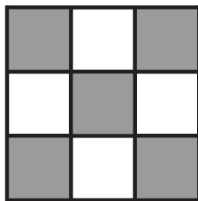
RGC threshold = 6

*Lección 4, Dificil 2: Estímulo preferido (izquierda) y esquema de conexión (derecha) para el circuito misterioso de nivel difícil 2 *Nota: debido a que la selectividad de velocidad de las células con orientación preferencial de RetINaBox es amplia, aceptamos cualquier valor de retardo de tiempo como correcto en el modo de descubrimiento.*

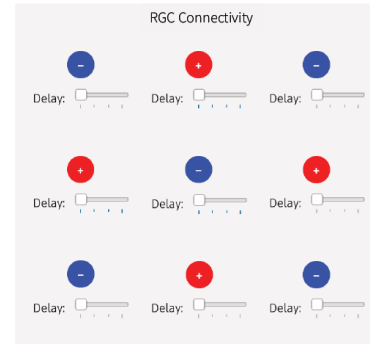
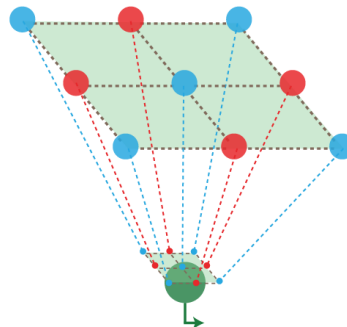
Dificil 3: Célula selectiva a una forma (diamante)

- Estímulo preferido: anillo de luz de tamaño mediano / forma de diamante (excluyendo el centro)
- Umbral de las células ganglionares: 4

Preferred stimulus



Circuit



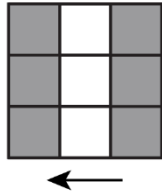
RGC threshold = 4

Lección 4, Dificil 3: Estímulo preferido (izquierda) y esquema de conexión (derecha) para el circuito de prueba de nivel difícil 3

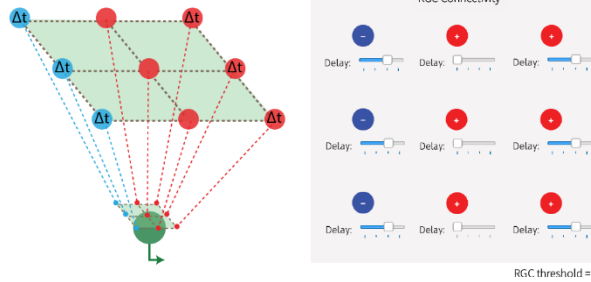
Dificil 4: Célula con selectividad direccional

- Estímulo preferido: barra vertical de luz que se mueve hacia la izquierda
- Los fotorreceptores de las columnas izquierda y derecha deben configurarse con un retardo de tiempo medio (para una explicación detallada sobre la suma de señales de entrada sincronizadas en el tiempo, consulte la lección 3, actividad n.º 3).
- Umbral de la célula ganglionar: 3

Preferred stimulus



Circuit



Lección 4, Difícil 4: Estimulo preferido (izquierda) y esquema de conexión (derecha) para el circuito de desafío de nivel difícil 4. *Nota: debido a que la selectividad de velocidad de las células con selectividad direccional de RetINaBox es amplia, en el modo de descubrimiento aceptamos cualquier valor de retardo de tiempo como correcto en los desafíos de selectividad direccional.