

Universidad de La Habana  
Facultad de Matemática y Computación



## Título de la tesis

Autor:

**Marié del Valle Reyes**

Tutores:

**Dr. Mitchell Valdes-Sosa**  
**Nombre del segundo tutor**

Trabajo de Diploma  
presentado en opción al título de  
Licenciada en Ciencia de la Computación

Fecha

[github.com/username/repo](https://github.com/username/repo)

Dedicación

# Agradecimientos

Agradecimientos

# Opinión del tutor

Opiniones de los tutores

# Resumen

Resumen en español

# Abstract

Resumen en inglés

# Índice general

<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1. Estado del Arte</b>	<b>4</b>
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>8</b>
2.1. fMRI . . . . .	8
2.2. Mapa Retinotópico . . . . .	10
2.2.1. Mapa Retinotópico Bayesiano . . . . .	13
2.3. Campos Receptivos de Población . . . . .	14
2.4. Modelo lineal mixto generalizado . . . . .	17
<b>3. Materiales y Métodos</b>	<b>18</b>
3.1. Datos . . . . .	18
3.1.1. Amplitudes de respuesta de la activación neuronal . . . . .	18
3.1.2. pRF . . . . .	19
3.2. Procesamiento de los datos . . . . .	20
3.2.1. Estimación de período preferido . . . . .	20
3.2.2. Limpieza de los datos . . . . .	20
3.3. Modelo lineal mixto . . . . .	21
3.3.1. Hipótesis 1 . . . . .	21
3.3.2. Modelo Lineal Mixto para la Frecuencia Espacial Preferida . .	21
<b>4. Resultados</b>	<b>25</b>
4.1. . . . . .	25
<b>5. Discusión</b>	<b>33</b>
<b>Conclusiones</b>	<b>35</b>
<b>Recomendaciones</b>	<b>36</b>





# Índice de figuras

2.1.	Diagrama de flujo que describe el procedimiento de estimación del modelo pRF. Tomado de [7] . . . . .	16
4.1.	Sigma . . . . .	30
4.2.	PP . . . . .	31
4.3.	sigma . . . . .	31
4.4.	pp . . . . .	32

## Ejemplos de código

# Introducción

El cerebro humano se concibe como un sistema complejo que controla y regula la mayoría de las funciones del cuerpo y de la mente. Este órgano desempeña un papel esencial en la percepción y el procesamiento de la información, debido a que es el encargado de recibir, interpretar y responder a los estímulos del entorno, lo cual permite a los individuos interactuar de manera efectiva con su mundo. La percepción implica, la interpretación y organización de los estímulos sensoriales para formar una representación consciente de la realidad. El cerebro procesa la información visual, auditiva, táctil y otras modalidades sensoriales, integrándola para construir una experiencia coherente y significativa del entorno circundante.

En la percepción visual, los hemisferios cerebrales se especializan en funciones diferentes, a pesar de colaborar estrechamente en el procesamiento de la información. Se ha observado [8] que para procesar aspectos globales y locales de estímulos visuales, el hemisferio derecho muestra una inclinación hacia lo global y el hemisferio izquierdo muestra una preferencia local. No obstante, cualquier teoría que se derive de estas consideraciones debe tener en cuenta que distintos aspectos de un estímulo visual pueden ser percibidos como globales en un contexto y como locales en otro. Por ejemplo, la percepción de un árbol puede considerarse global en comparación con una sola hoja, pero local en relación con un bosque.

Una hipótesis dominante sobre cómo se diferencian los niveles globales y locales en el cerebro es en términos de sus frecuencias espaciales (SF). En el contexto visual, las SF se refieren al número de ciclos de un estímulo visual por unidad de ángulo visual, y es una propiedad importante de los estímulos visuales a la que las neuronas son sensibles. Estudios realizados [8] muestran que las SF más bajas se asocian comúnmente con aspectos globales en el hemisferio derecho, mientras que las SF más altas se asocian con aspectos locales en el hemisferio izquierdo.

La medición de los campos receptivos de la población (pRF) mediante resonancia magnética funcional (fMRI) constituye una posible herramienta para evaluar y medir la lateralización hemisférica. Los pRFs constituyen modelos cuantitativos que predicen la actividad neuronal colectiva en un vóxel de fMRI en función de la selectividad de la respuesta a la posición del estímulo en el espacio visual. Estos modelos suelen estimar la posición y el tamaño de la sección del campo visual que afecta a un vóxel específico.

poner en  
inglés

referenciar?

La lateralización hemisférica puede estar vinculada a las propiedades de los pRfs.

Por otra parte, se ha establecido que las neuronas en la corteza visual de los primates (específicamente en el área V1) muestran una sintonización con la frecuencia espacial, la cual depende de su ubicación en el campo visual. Existen modelos que determinan la frecuencia espacial preferida de los vóxeles o conjuntos de vóxeles de diferentes áreas visuales ([1], [6]). Considerando la sensibilidad de diferentes frecuencias espaciales de estímulos visuales en los hemisferios cerebrales, una metodología para medir la lateralidad hemisférica podría ser la comparación de la frecuencia espacial preferida de vóxeles homólogos en ambos hemisferios cerebrales.

El propósito del presente trabajo consiste en emplear modelos de pRF y modelos encargados de estimar la frecuencia preferida de los vóxeles, con el fin de evaluar la lateralización hemisférica en el cerebro humano. La hipótesis que guía nuestra investigación sostiene que los tamaños de los pRFs en el hemisferio derecho, en comparación con los tamaños de los pRFs análogos en el hemisferio izquierdo, deben ser mayores. Asimismo, se postula que las frecuencias preferidas de los vóxeles en el hemisferio derecho deberían ser menores que las de los vóxeles homólogos en el hemisferio izquierdo. Se estipula, además, que esta diferencia debería ser más pronunciada en áreas superiores del procesamiento visual.

En el marco de la presente investigación, se utilizará un enfoque basado en modelos estadísticos avanzados, específicamente un modelo lineal mixto. Este modelo permitirá abordar la complejidad inherente a la variabilidad interindividual, proporcionando así una evaluación robusta de las diferencias observadas.

Adicionalmente, se llevará a cabo la simulación de los resultados empleando un modelo de red neuronal artificial. Este enfoque se ha diseñado como una herramienta complementaria para la representación en el sistema visual de los resultados obtenidos. La utilización de una red neuronal artificial permitirá no solo corroborar los hallazgos observados con el modelo lineal generalizado mixto, sino también proporcionar una perspectiva más detallada de las complejas interrelaciones subyacentes en la organización hemisférica del procesamiento visual.

El objetivo general de este estudio es analizar la lateralización hemisférica en el procesamiento visual del cerebro humano, centrándose específicamente en la comparación de los tamaños de pRF y las SP preferidas de vóxeles homólogos en el hemisferio derecho e izquierdo, utilizando datos de fMRI.

Para lograr el objetivo general del presente trabajo se trazan los siguientes objetivos específicos:

- Aprender los elementos teóricos de la lateralidad hemisférica cerebral.
- Estudiar el estado del arte sobre los modelos de pRF y modelos de estimación de SF preferida de los vóxeles en áreas visuales.

- Implementar y evaluar las estrategias concebidas para el análisis de las diferencias en ambos hemisferios cerebrales, en el tamaño de los pRF y la preferencia de frecuencia espacial de vóxeles homólogos.

En lo siguiente, esta tesis se divide en cuatro capítulos. El primero refiere un estudio sobre trabajos relacionados al tema presentado. En el segundo, se ofrecerá una visión general de los conceptos teóricos asociados a mapas retinotópicos, modelos de pRF y modelos de estimación de frecuencia espacial preferida. En tercer capítulo, se describe en detalle la metodología para abordar la investigación sobre la lateralidad hemisférica, incluyendo aspectos clave del enfoque analítico. Detalles técnicos de la implementación del sistema se presentan en el cuarto capítulo, donde se explora cualitativamente la validez de la solución implementada, aprovechando las herramientas disponibles. Se describen los métodos y técnicas utilizadas para evaluar la lateralidad hemisférica en áreas visuales, destacando los resultados y observaciones obtenidas durante la experimentación.

Esto no  
es seguro

# Capítulo 1

## Estado del Arte

### **Asimetría hemisférica en humanos en la percepción visual y relación con frecuencia espacial de los estímulos visuales**

La asimetría hemisférica indica que cada hemisferio del cerebro tiene especializaciones únicas en el procesamiento de la información visual, contribuyendo de manera distinta a la comprensión y percepción del mundo visual. A lo largo de las décadas, diversas investigaciones han revelado que mientras el hemisferio izquierdo es más eficaz en el procesamiento de detalles finos y de alta frecuencia, el derecho sobresale en la percepción de patrones globales y de baja frecuencia.

En [8] se profundiza en la asimetría hemisférica del cerebro y la relación entre la percepción global/local y el procesamiento de frecuencias espaciales (SF) en estímulos visuales. Se revisan investigaciones que sugieren que las frecuencias bajas (LSF) se asocian con la percepción global, procesadas predominantemente por el hemisferio derecho, mientras que las altas (HSF) se vinculan con la percepción local, manejadas por el hemisferio izquierdo.

El artículo expone que existen diversos estudios cognitivos, neuropsicológicos y neurofisiológicos donde se han encontrado diferencias hemisféricas funcionales en el procesamiento global/local, con el hemisferio derecho del cerebro demostrando un sesgo global y el hemisferio izquierdo demostrando un sesgo local. Por ejemplo, al presentar visualizaciones de letras de Navon ([14]) en los campos visuales derecho e izquierdo los resultados revelan que los participantes identifican más rápido la letra global cuando se presenta en el campo visual izquierdo (proyectado al hemisferio derecho) y más rápido la letra local cuando se presenta en el campo visual derecho (proyectado al hemisferio izquierdo). Este sesgo también se ve respaldado por investigaciones con pacientes con lesiones cerebrales, donde se identificó que un grupo de pacientes con lesiones centradas en el hemisferio derecho experimentaban dificultades selectivas en la percepción de elementos globales en estímulos de letras de Navon, mientras que otro grupo de pacientes con lesiones centradas en el hemisferio izquier-

do manifestaba selectivamente problemas para percibir elementos locales. También se expone que estudios de fMRI y de electroencefalograma (EEG) respaldaron esta asimetría.

ver si  
escribi  
abre-  
viatura  
antes

Por otra parte, se explica que la relación entre las LSF y la percepción global, así como entre las HSF y la percepción local, se evidenció en experimentos donde los sujetos participaron en la detección de rejillas de SF en tareas global/local. Se observó que eran más eficientes en la detección de rejillas LSF después de prestar atención a una forma global, mientras que eran más hábiles en la detección de rejillas HSF después de focalizar su atención en las formas locales. Además, se han demostrado que la identificación de una rejilla sinusoidal con líneas "más gruesas" respalda un proceso del hemisferio derecho sesgado hacia los LSF, mientras que la identificación de líneas "más delgadas" respalda un proceso del hemisferio izquierdo sesgado hacia los HSF.

## Mapas Retinotópicos

Un mapa retinotópico es la organización de la corteza visual en el cerebro que refleja la disposición espacial de la retina. Se cumple que puntos cercanos en la retina se corresponden con puntos cercanos en la corteza visual, lo cual implica que la disposición espacial de las imágenes en la retina se conserva en la representación cortical. Estos mapas son fundamentales para entender cómo el cerebro procesa la información visual y cómo se traducen las imágenes visuales en percepciones.

estoy  
diciendo  
lo mismo  
dos veces

En [17] se aborda el mapeo retinotópico en el cerebro humano utilizando fMRI. Se enfoca en los avances realizados en los últimos 25 años en la comprensión de los mapas de campos visuales en el cerebro humano, destacando el progreso significativo en las tecnologías de fMRI y en los métodos experimentales.

En [5] se examina la organización retinotópica de V1 , demostrando que la topología superficial del cerebro puede predecir con precisión la función retinotópica interna. Con estudios de fMRI, se hallaron en los participantes las medidas utilizadas para describir la localización de las respuestas neuronales en la corteza visual (ángulo polar y excentricidad), y se desarrolló un modelo algebraico para ajustar estos datos.

ver si lo  
puse en  
intro

En [3] se introduce un enfoque de análisis bayesiano para mapear mapas retinotópicos en el cerebro humano. Se presenta un modelo que combina datos retinotópicos (ángulo polar y excentricidad) y un atlas retinotópico preexistente a través de inferencia bayesiana, mejorando así la precisión y completitud de los mapas retinotópicos.

definición  
atlas?

## Modelos de Campo Receptivo de Población

El campo receptivo de población (pRF) es un concepto en neurociencia que describe un modelo que representa cómo un grupo de neuronas en una región específica

del cerebro responde colectivamente a un estímulo visual. Este modelo permite entender mejor la actividad y la organización de la corteza visual, mostrando cómo diferentes áreas procesan información visual en conjunto, en lugar de enfocarse en las respuestas de neuronas individuales. Este modelo se ha utilizado para mapear la organización cortical, revelar los efectos de la atención en el procesamiento visual y mostrar diferencias en pacientes y poblaciones especiales.

En [7] se formula un modelo matemático del pRF utilizando una función Gaussiana que describe cómo la respuesta neuronal varía con la distancia desde el centro del campo receptivo. Incluye parámetros como la posición del centro del pRF, su tamaño, y la magnitud de la respuesta. La función Gaussiana se ajusta a los datos de actividad neuronal, obtenidos a través fMRI, para estimar las características del pRF en una población neuronal específica.

En [20] se introduce un modelo de pRF basado en la función Diferencia de Gaussianas (DoG), mejorando la capacidad de representar respuestas inhibitorias y la supresión periférica en la corteza visual.

En [13] se desarrolla un modelo de pRF con una no linealidad estática compresiva, es decir, reduce la amplitud de las respuestas a medida que aumenta la intensidad del estímulo. Este modelo explica que la respuesta total a estímulos múltiples es menor que la suma de respuestas individuales.

En [2] se analizan los mapas de campo visual y los tamaños de los pRF en el complejo MT+ humano, usando fMRI. Se halló que el tamaño de los pRF aumenta progresivamente desde V1/2/3 hasta LO-1/2 y TO-1/2, siendo TO-2 el área con los pRF más grandes. También observaron que dentro de cada mapa, el tamaño de los pRF aumenta con la excentricidad.

poner  
que es  
MT

En [19] se examina la organización del mapa visual del área hV4 y la corteza occipital ventral a través de fMRI y técnicas de pRF.

En [15] se investigan los pRFs en personas con trastornos del espectro autista.

En [16] se destaca la utilización de modelos pRFs para caracterizar las respuestas neurales a diferentes estímulos y tareas visuales y se enfoca en la aplicación de pRFs para entender la atención, la plasticidad y las diferencias en condiciones psiquiátricas y neurológicas.

En [12] se realiza un estudio que muestra que la atención aumenta la ganancia, el tamaño y la excentricidad de los pRF en áreas de alto nivel, pero no en áreas visuales tempranas.

En [18] se analiza cómo la corteza visual humana procesa la información cromática a través de mediciones de campos receptivos de población (pRF) usando fMRI.

En [4] del Human Connectome Project, los pRF se utilizan para analizar la organización retinotópica de la corteza visual y subcortical en 181 adultos sanos.

En de [10] se comparan las propiedades de los pRFs de dos conjuntos de datos diferentes: uno de la Universidad de Nueva York (NYU) y otro del Human Connectome



Project (HCP) [4].

## Análisis de modelos de representación en el sistema visual humano

Las representaciones en el sistema visual humano se refieren a cómo el cerebro interpreta y procesa la información visual que recibe desde la retina. Incluyen desde la percepción básica de formas, colores y movimientos, hasta la interpretación compleja de escenas, rostros y expresiones emocionales. Con el objetivo de entender mejor la visión humana, se han desarrollado modelos que combinan las neurociencias, la psicología y la inteligencia artificial.

En [9] se midieron curvas de sintonización de frecuencia espacial en áreas como V1, V2, VP, V3, V4v, V3A, y V5+, utilizando fMRI. Se observó que la frecuencia espacial óptima disminuye con el aumento de la excentricidad visual y varía según la ubicación retinotópica. Estos hallazgos apoyan la idea de que diferentes áreas visuales procesan la información visual en distintas escalas espaciales.

En [1] se aplica un modelo log-Gaussiano para estimar la sintonización de frecuencia espacial a nivel de cada vóxel cerebral, revelando cómo varía la sensibilidad a la frecuencia espacial en la corteza visual inferior. Se miden respuestas a estímulos visuales de diferentes frecuencias espaciales, a través de fMRI. Los resultados indican que la frecuencia espacial preferida disminuye con la excentricidad visual y varía en función de la ubicación retinotópica. Además, se observa que el ancho de banda de sintonización depende de la excentricidad y está correlacionado con el pico de frecuencia espacial preferida.

En [11] se propone el desarrollo de modelos de campo receptivo en la corteza visual primaria utilizando fMRI. Critica los métodos convencionales como la *medición de curvas de sintonización* y la *clasificación de patrones multivariados*, y propone en su lugar la estimación del campo receptivo, método que permite medir respuestas a una amplia gama de estímulos y desarrollar modelos que describan cómo los estímulos se traducen en respuestas neuronales.

En [6] se desarrollaron modelos para analizar la sintonización de la frecuencia espacial en la corteza visual primaria humana. Se ajustaron curvas de sintonización log-normal a las respuestas de grupos de vóxeles en diferentes excentricidades, que permiten estimar la respuesta promedio en la señal asociada con la dependencia del nivel de oxígeno en la sangre, en diferentes frecuencias espaciales. Los resultados muestran que la frecuencia espacial preferida varía inversamente con la excentricidad y se ve influenciada por la orientación del estímulo. Constituye una ampliación a la investigación previa sobre la sintonización de la frecuencia espacial en el córtex visual humano, como la realizada por [1].

# Capítulo 2

## Marco Teórico

### 2.1. fMRI

La resonancia magnética funcional (fMRI) es una técnica no invasiva para estudiar la activación cerebral. Durante el transcurso de la sesión de exploración, se pide al sujeto que realice una determinada tarea, que experimente un estado psicológico o conductual inducido o que simplemente descanse. Mide los cambios en la oxigenación de la sangre y el flujo sanguíneo relacionados con la actividad neuronal, proporcionando medios para estudiar la función del cerebro humano in vivo, ya sea en respuesta a una determinada tarea o en reposo. Durante las últimas dos décadas, la resonancia magnética funcional ha brindado a los investigadores un acceso sin precedentes al funcionamiento interno del cerebro humano, lo que a su vez ha llevado a nuevos conocimientos sobre cómo el cerebro procesa la información.

Los datos adquiridos en un estudio de resonancia magnética funcional consisten en una secuencia de imágenes de resonancia magnética (IRM) tridimensionales, cada una compuesta por una serie de elementos de volumen o vóxeles uniformemente espaciados. Los vóxeles dividen el cerebro en una gran cantidad de cubos del mismo tamaño. Una imagen típica puede constar de aproximadamente 100.000 vóxeles, donde el valor de intensidad de la imagen correspondiente a cada vóxel representa la distribución espacial de la densidad del espín nuclear, que se relaciona con la oxigenación y el flujo de la sangre, en el área local. Durante un experimento de resonancia magnética funcional se obtienen entre 100 y 1.000 imágenes tridimensionales de todo el cerebro. Además, un experimento de resonancia magnética funcional estándar consta de múltiples sujetos (p. ej., 10 - 50), potencialmente llevados a múltiples sesiones de exploración, cada una de las cuales consta de varias repeticiones de una determinada tarea experimental.

Claramente, la cantidad de datos disponibles de un solo experimento es extremadamente grande, y el análisis de los datos de la resonancia magnética funcional es

un ejemplo del tipo de problema moderno de big data que está cambiando fundamentalmente las ciencias cuantitativas. Además, los datos exhiben una complicada estructura de ruido temporal y espacial con una señal relativamente débil (aunque, con métodos apropiados, estas señales en todo el cerebro pueden ser altamente predictivas de estados psicológicos y clínicos). Por lo tanto, los datos disponibles no sólo son masivos en escala sino también complejos, lo que hace que el análisis estadístico de los datos de la resonancia magnética funcional sea una tarea difícil.

La capacidad de conectar medidas de activación cerebral, obtenidas mediante fMRI, con la actividad neuronal subyacente que las causó, tendrá un gran impacto en la elección del procedimiento estadístico, así como en las conclusiones posteriores que se puedan extraer del experimento. Por lo tanto, desde una perspectiva de modelado, es fundamental obtener una comprensión básica de la anatomía y fisiología del cerebro para comprender mejor los datos disponibles.

El método más popular para realizar fMRI utiliza el contraste dependiente del nivel de oxigenación sanguínea (BOLD) ([50, 28]), medido utilizando la diferencia de señal entre una serie de imágenes ponderadas en  $T^*2$ .

Las imágenes BOLD aprovechan las diferencias en las propiedades magnéticas de la hemoglobina oxigenada y desoxigenada. A medida que aumenta la actividad neuronal, también aumentan las demandas metabólicas de oxígeno y nutrientes en las regiones afectadas del cerebro. La activación neuronal indica la extracción de oxígeno de la hemoglobina en la sangre. Esta extracción hace que la hemoglobina se vuelva paramagnética a medida que los átomos de hierro están más expuestos al agua circundante. Esto crea pequeñas distorsiones en el campo magnético que causan una disminución en  $T^*2$ , lo que lleva a una caída más rápida de la señal y una disminución local de la señal BOLD. Una sobrecompensación posterior en el flujo sanguíneo aumenta la cantidad de hemoglobina oxigenada, lo que lleva a una reducción de la pérdida de señal y un aumento de la señal BOLD en la región afectada.

BOLD fMRI nos permite estudiar las respuestas hemodinámicas a la activación neuronal. El cambio en la señal de resonancia magnética causado por un evento neuronal generalmente se denomina función de respuesta hemodinámica (HRF). El aumento de las demandas metabólicas debido a la actividad neuronal conduce a un aumento en el flujo de sangre oxigenada a las regiones activas del cerebro. Dado que se suministra más oxígeno del que realmente se consume, esto conduce a una disminución de la concentración de hemoglobina desoxigenada, lo que conduce a un aumento de la señal. Este aumento positivo en la señal comienza aproximadamente 1 a 2 segundos después del inicio de la actividad neuronal y alcanza su punto máximo 5 a 8 segundos después del pico de actividad neuronal. Después de alcanzar su nivel máximo, la señal BOLD disminuye a un nivel inferior al inicial que se mantiene durante aproximadamente 10 segundos. Este efecto, conocido como insuficiencia post-estímulo, se debe al hecho de que el flujo sanguíneo disminuye más rápidamente que el volumen sanguíneo, lo

explicar  
esto

que permite una mayor concentración de hemoglobina desoxigenada en regiones del cerebro previamente activas.

Claramente, la señal BOLD solo proporciona una medida indirecta de la cantidad que realmente buscamos medir, que es la activación neuronal subyacente. Por lo tanto, es importante comprender qué tan bien la señal BOLD refleja los aumentos reales en la activación neuronal. La respuesta a esta pregunta es compleja, y comprender las bases fisiológicas de la respuesta BOLD ha sido durante mucho tiempo un tema de intenso interés en la investigación. En resumen, se ha demostrado que la señal BOLD se corresponde estrechamente con el potencial del campo eléctrico local que rodea a un grupo de células, lo que probablemente refleje cambios en la actividad postsináptica en muchas condiciones. Sin embargo, en otras condiciones, la actividad neuronal y la señal BOLD pueden desacoplarse. Por lo tanto, es probable que la señal BOLD solo refleje una parte de los cambios en la actividad neuronal en respuesta a una tarea o estado psicológico. Por esta razón, muchas regiones pueden presentar cambios en la actividad neuronal que se pasan por alto porque no cambian la demanda metabólica neta de la región.

demasiado,  
poner  
distribui-  
ción y  
fórmula

Hay varios objetivos comunes en el análisis de datos de fMRI. Estos incluyen localizar regiones del cerebro activadas por una determinada tarea, determinar redes distribuidas que corresponden a la función cerebral y hacer predicciones sobre estados psicológicos o patológicos. Muchos de estos objetivos están relacionados con la comprensión de cómo los estados psicológicos inducidos o medidos conducen a cambios en la actividad cerebral (una combinación de función neuronal y glial), y otros están relacionados con el análisis de fluctuaciones espontáneas en curso. Todos estos objetivos son de naturaleza intrínsecamente estadística, y esta área es el dominio principal de los estadísticos actualmente involucrados en este campo.

fMRI (Resonancia Magnética Funcional): La fMRI es una técnica de neuroimagen que mide la actividad cerebral midiendo los cambios en el flujo sanguíneo relacionados con la actividad neuronal. Los datos fMRI se procesan para obtener la respuesta hemodinámica en forma de betas, que representan la fuerza y dirección de la relación entre la actividad neuronal y la señal de la imagen.

BOLD y HRF

poner

Modelo Lineal Generalizado (GLM): Es un enfoque estadístico utilizado para modelar la relación entre los estímulos y las respuestas fMRI. Ayuda a identificar áreas del cerebro que están activas en respuesta a ciertos estímulos o tareas.

GMLDenoise: Es una herramienta que se utiliza para mejorar la calidad de los datos fMRI mediante la eliminación de artefactos y ruido, permitiendo una interpretación más precisa de la actividad neuronal.

## 2.2. Mapa Retinotópico

explicar  
excen-  
tricidad,  
ángulo  
polar,  
sigma.

Un mapa retinotópico es una representación bidimensional de la superficie de la retina en una región específica del sistema visual del cerebro. La información visual se organiza de manera topográfica, lo que significa que la posición relativa de las células en la retina se mantiene en la corteza visual. Las ubicaciones cercanas en la retina se proyectan a áreas cercanas en la corteza.

La corteza visual humana está organizada en múltiples mapas retinotópicos. Caracterizar la disposición de estos mapas en la superficie cortical es esencial para muchos estudios de neurociencia visual.

la mayoría de los análisis retinotópicos de datos de resonancia magnética funcional utilizan un enfoque de vóxeles. El método general es (1) medir las respuestas al mapeo de estímulos, (2) derivar coordenadas retinotópicas para cada vóxel o vértice de superficie analizando ondas viajeras (Sereno et al., 1995; Engel et al., 1997b) o resolviendo un modelo de campo receptivo de población (pRF) (Dumoulin y Wandell, 2008) para cada vóxel, y (3) para identificar límites de área mediante inspección visual. Además de requerir mucho tiempo y esfuerzo, los mapas que resultan de este proceso conservan muchas fuentes comunes de error. Debido a las diversas fuentes de ruido, los mapas medidos tienen discontinuidades y a menudo omiten sistemáticamente porciones del campo visual. Estas muchas deficiencias del proceso de mapeo retinotópico tradicional se derivan del hecho de que se organiza en torno a la optimización del poder explicativo de las soluciones de retinotopía a partir de vóxeles individuales, en lugar de todo el campo visual o el área cortical. Como consecuencia, produce mapas que no son uniformes ni completos, ni se basan en ningún contexto de cómo el campo visual se deforma en la superficie cortical. Sin estos datos, la comparación de mapas entre sujetos es difícil y el examen cuantitativo preciso de las diferencias individuales es imposible.

Las respuestas visuales en una parte sustancial del cerebro humano están organizadas en mapas retinotópicos, en los que las posiciones cercanas en el cerebro representan ubicaciones adyacentes en la imagen. La medición precisa de estos mapas mediante imágenes por resonancia magnética funcional (fMRI) es esencial para una amplia gama de aplicaciones clínicas y de neurociencia (Wandell y Winawer, 2011), en las que a menudo proporcionan una base para comparar mediciones entre individuos, grupos, tareas y estímulos. y laboratorios.

El método bayesiano surge por la necesidad de ajustar un mapa retinotópico a la superficie cortical de un sujeto basándose en mediciones, sin intervención humana.

Nos referimos a los mapas retinotópicos predichos utilizando métodos de vóxel como derivados de "Solo datos" porque los parámetros de pRF de los vóxeles individuales provienen de mediciones empíricas pero no están contextualizados en un modelo de mapas retinotópicos.

Una alternativa al modelado de vóxeles de datos de resonancia magnética funcional es construir un atlas retinotópico, un modelo computacional del mapeo entre la

posición del campo visual y la estructura cortical. Los atlas generalmente se ajustan a una descripción promedio del grupo de la función en la superficie cortical después del registro conjunto de la superficie cortical entre sujetos (Dale et al., 1999; Fischl et al., 1999a). Estas descripciones son útiles a pesar de la gran variación entre sujetos porque el registro conjunto de las anatomías de superficie entre sujetos también mejora la alineación de la función cortical entre sujetos. El atlas, después de adaptarse a los datos de entrenamiento, se aplica a una imagen de RM anatómica individual sin datos funcionales mediante la alineación anatómica de la imagen con el atlas seguida de interpolación. Estos atlas resuelven dos de los problemas de los mapas retinotópicos de vóxeles: representan todo el campo visual y son suaves, pero están limitados por la calidad de la alineación anatómica y proporcionan sólo una descripción de la media; no pueden capturar las idiosincrasias de los mapas en un sujeto individual porque suponen que una vez que se encuentra una correspondencia entre el patrón del surco en las cortezas visuales de dos sujetos, la función coincidirá. Por lo tanto, si uno estuviera interesado en la variación individual en la topografía cortical después del registro anatómico, este método no es informativo: supone que la respuesta es 0. En consecuencia, nos referimos a los mapas retinotópicos predichos por los atlas como derivados de 'Anatomía sola'.

La propuesta describe la aplicación de un modelo bayesiano para abordar problemas en la representación de mapas retinotópicos basados en atlas y voxels. La hipótesis es que este enfoque, que combina datos (mediciones de voxels o vértices retinotópicos) con un modelo previo (un atlas derivado de la anatomía completa), puede superar los problemas asociados con el mapeo retinotópico. La idea es optimizar la descripción de mapas retinotópicos corticales al considerar el campo visual completo y la corteza correspondiente.

La propuesta sugiere que este método puede proporcionar una descripción más precisa de los mapas retinotópicos corticales en sujetos individuales en comparación con el uso de un atlas solo o mediciones individuales. Se basa en la observación de que, a pesar de las alineaciones anatómicas, persisten diferencias notables y sistemáticas en la relación entre la estructura y la función en trabajos anteriores que emplean datos funcionales para complementar alineaciones analíticas globales entre sujetos.

Además, se argumenta que la forma básica del atlas es lo suficientemente precisa como para mejorar la estimación del mapa retinotópico en comparación con las mediciones individuales solas. La incorporación de datos de mediciones individuales se considera valiosa para capturar diferencias individuales que pueden no reflejarse completamente en el atlas general.

La propuesta sostiene que la combinación de datos individuales y un modelo previo mediante un enfoque bayesiano puede mejorar la precisión y la representación de los mapas retinotópicos corticales en sujetos individuales, superando limitaciones asociadas con enfoques basados únicamente en atlas o mediciones solas.

### 2.2.1. Mapa Retinotópico Bayesiano

Los mapas retinotópicos se predicen utilizando métodos de vóxel como derivados de "Solo datos" porque los parámetros de pRF de los vóxeles individuales provienen de mediciones empíricas pero no están contextualizados en un modelo de mapas retinotópicos.

El método tiene la ventaja de permitir que el atlas retinotópico actúe como una restricción previa a los nuevos datos observados. Este es un modelo bayesiano en el sentido general de combinar una creencia previa con una medición para hacer una inferencia. El cálculo se puede formular en un marco bayesiano explícito. Definimos una hipótesis  $H$  como una deformación particular de la superficie cortical y definimos la evidencia  $E$  como un conjunto particular de mediciones retinotópicas.

formulas

La formulación bayesiana explícita anterior aclara varias características de nuestro modelo. Primero, las distribuciones de probabilidad previas asumidas para las longitudes de los vértices son las mismas para todos los vértices (filas 1, 5 y seis en la Tabla 2;  $P(H)$  en la Ecuación 1). Si tuviéramos mapas de verdad sobre el terreno para una población grande, podríamos, en principio, derivar distribuciones de probabilidad específicas de los bordes para la Ecuación 1 y convertirlas en funciones de costos específicas de los bordes (Tabla 1) para el proceso de minimización. Podemos tener una idea de cómo estas distribuciones pueden diferir en la corteza occipital visualizando los campos de deformación de nuestro conjunto de datos (archivo complementario 1). Estos campos muestran que nuestro proceso de registro hace que algunos vértices se muevan mucho más que otros, al menos en nuestro pequeño grupo de sujetos ( $n = 8$ ). Estos campos de deformación no son suficientes para derivar antecedentes específicos de los bordes porque el número de sujetos es pequeño y porque no sabemos que los puntos finales del registro reflejan los mapas de verdad del terreno. El uso de un gran conjunto de datos, como los 181 sujetos HCP (Benson et al., 2018) podría ser útil en trabajos futuros para derivar antecedentes específicos de los bordes. Un desafío adicional para incorporar antecedentes realistas sería capturar las dependencias entre los bordes en la distribución previa (la distribución de probabilidad conjunta, que sería una función de miles de variables, una por borde, imponiendo una enorme carga computacional).

En el contexto del estudio de Benson et al. (2012), el "ángulo polar" y la "excentricidad" se refieren a medidas utilizadas para describir la localización de las respuestas neuronales en el córtex visual. El ángulo polar indica la posición angular de un estímulo visual en el campo visual, como su posición relativa de arriba a abajo o de izquierda a derecha. La excentricidad, por otro lado, se refiere a la distancia de un estímulo visual desde el punto de fijación central en el campo visual, es decir, qué tan lejos está del centro de la visión. Estas medidas son clave para entender cómo el córtex visual mapea la información visual del mundo externo. Explicar en que consiste

Mapas Retinotópicos: Son representaciones topográficas de la retina en el cerebro, ayudando a comprender cómo el cerebro organiza y procesa la información visual. Estos mapas se generan identificando las regiones cerebrales que responden a estímulos visuales específicos.

Mapa Retinotópico Bayesiano de Benson: Es un enfoque que utiliza métodos bayesianos para mapear las áreas visuales en el cerebro, mejorando la precisión en la identificación de regiones retinotópicas.

## 2.3. Campos Receptivos de Población

Según Kandel , en el sistema visual, el campo receptivo de una neurona representa una pequeña ventana en el campo visual. Comprender los campos receptivos es esencial para entender cómo las neuronas responden a estímulos visuales. La evolución de esta perspectiva ha llevado a la conceptualización de los campos receptivos de población (pRF) . Mientras que los campos receptivos convencionales describen las áreas específicas del espacio visual que activan una única neurona, los pRF se centran en la actividad de toda una población de neuronas. Estos, constituyen modelos cuantitativos que predicen la actividad neuronal colectiva en un vóxel de fMRI y tienen en cuenta la selectividad de la respuesta neuronal en relación con la posición del estímulo en el espacio visual. Además, la estimación de la posición y el tamaño de la sección del campo visual que afecta a un vóxel específico, permite una visión más integral de cómo se procesa y representa la información visual en el cerebro.

En el modelo propuesto en [7] la estimación de los parámetros de los pRF se llevó a cabo utilizando datos de series temporales de respuestas de fMRI (Ver Fig 2.1) . El modelo se basa en la suposición de una relación lineal entre los niveles de oxigenación de la sangre (BOLD, por sus siglas en inglés) y las señales de resonancia magnética. Esta relación entre la señal observada  $y(t)$  y la señal BOLD predicha  $p(t)$  se expresa mediante la ecuación:

$$y(t) = p(t)\beta + e \quad (2.1)$$

donde  $\beta$  es un factor de escala que tiene en cuenta las unidades desconocidas de la señal de fMRI y  $e$  es el ruido de la medición.

La predicción  $p(t)$  se calcula utilizando un modelo parametrizado de la población neuronal subyacente y el estímulo. Se emplea un modelo gaussiano bidimensional  $g(x,y)$  para describir la respuesta de la población neuronal, el cual está definido por tres parámetros  $x_0$ ,  $y_0$  y  $\sigma$ ,

$$g(x,y) = \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.2)$$

citar

ya puse  
siglas  
antesver por  
qué no  
funciona  
link ima-  
genver si  
puse si-  
glas an-  
tes



donde  $(x_0, y_0)$  es el centro del pRF y  $\sigma$  es la dispersión gaussiana o desviación estándar que caracteriza la extensión del pRF. Estos parámetros están referidos a estímulos, por tanto, las unidades de  $x_0$ ,  $y_0$  y  $\sigma$  están todas en grados de ángulo visual. La fórmula que describe el estímulo efectivo  $s(x, y, t)$  es una función indicadora binaria que marca la posición de la apertura del estímulo en cada momento. La apertura del estímulo es la región específica de un estímulo visual que está siendo presentada o activada en un momento dado durante un experimento, por tanto, la función indicadora sería 1 en las posiciones dentro de la apertura y 0 fuera de ella.

Una vez obtenido un modelo de pRF determinado y un estímulo efectivo, se calcula la respuesta de pRF prevista. Dado que la fórmula de pRF (2.2) y la del estímulo efectivo se definen en las unidades comunes del espacio visual, para predecir la serie temporal de fMRI, es necesario calcular la superposición entre el estímulo efectivo y el modelo de pRF en un vóxel.

$$r(t) = \sum_{x,y} s(x, y, t) g(x, y) \quad (2.3)$$

Luego, se obtiene la predicción  $p(t)$  de la serie temporal al convolucionar  $r(t)$  con un modelo de la función de respuesta hemodinámica (HRF;  $h(t)$ ) (Boynton et al., 1996; Friston et al., 1998) , el cual se estima por separado para cada sujeto.

$$p(t) = r(t) * h(t) \quad (2.4)$$

La bondad de ajuste se estima calculando la suma de cuadrados residual (RSS) entre la predicción,  $p(t)$ , y los datos,  $y(t)$ . Este término de error se calcula teniendo en cuenta un factor de escala,  $\beta$ , que tiene en cuenta las unidades desconocidas de la señal de fMRI.

$$RSS = \sum_t (y(t) - p(t)\beta)^2 \quad (2.5)$$

Los parámetros óptimos de pRF se encuentran minimizando el RSS mediante una búsqueda de dos etapas de gruesa a fina (Ver [7] para más detalles), enfoque que minimiza el tiempo de procesamiento y aumenta la probabilidad de encontrar un mínimo global. Se estiman tres parámetros del modelo pRF para cada vóxel de forma independiente:  $x_0$ ,  $y_0$  y  $\sigma$ . Estos, se estiman simultáneamente utilizando múltiples series temporales de resonancia magnética funcional medidas con varias aperturas de estímulo diferentes.

El ajuste de pRF permite derivar varias descripciones detalladas de los datos obtenidos. Entre ellas se encuentran los mapas tradicionales de excentricidad y ángulo polar, que revelan la disposición espacial y la orientación preferida de los campos receptivos en la población neuronal.

ver si se  
pone re-  
ferencia  
o no

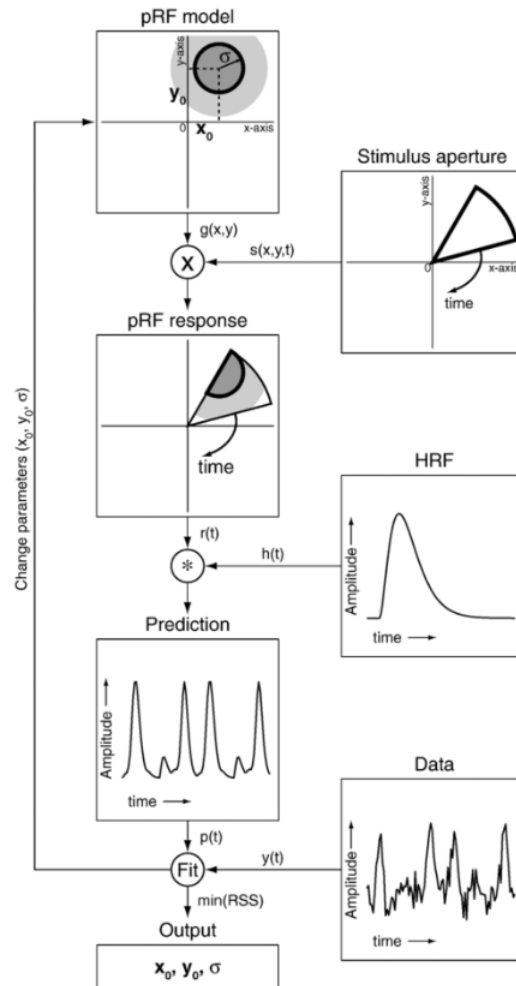


Figura 2.1: Diagrama de flujo que describe el procedimiento de estimación del modelo pRF. Tomado de [7]

## 2.4. Modelo lineal mixto generalizado

Los modelos lineales mixtos generalizados (GLMM) son una poderosa clase de modelos estadísticos que combinan las características de los modelos lineales generalizados y los modelos mixtos (modelos con variables predictivas tanto fijas como aleatorias). Manejan una amplia gama de tipos de variables de respuesta y una amplia gama de escenarios en los que las observaciones se han muestreado en algún tipo de grupo en lugar de hacerlo de forma completamente independiente. Si bien no pueden hacerlo todo (un experto a veces puede elegir modelos personalizados para mayor flexibilidad (Bolker et al. 2013), los GLMM son rápidos, potentes, pueden ampliarse para manejar complejidades adicionales, como respuestas infladas a cero, y pueden suelen estar equipados con software disponible en el mercado. Las únicas desventajas reales de los GLMM se deben a su generalidad: (1) algunas recetas estándar para pruebas e inferencias de modelos no se aplican, y (2) es fácil construir modelos plausibles que son demasiado complejos para que sus datos los respalden. Los GLMM todavía son parte de la frontera estadística e incluso los expertos no conocen todas las respuestas sobre cómo usarlos, pero este capítulo intentará brindar soluciones prácticas que le permitan utilizar GLMM con sus datos.

Modelos Lineales Mixtos Generalizados (GLMM): Son extensiones de los modelos lineales generalizados que incorporan términos aleatorios para tener en cuenta la variabilidad no explicada por las variables fijas. Se utilizan para analizar datos cuando hay correlación o agrupación en los datos, como en estudios longitudinales o con múltiples niveles de jerarquía.

# Capítulo 3

## Materiales y Métodos

poner  
párrafo  
introduc-  
torio

### 3.1. Datos

Se emplearon los datos analizados en el estudio de [6], donde se lleva a cabo un experimento con la participación de 12 sujetos. El objetivo principal de este experimento fue explicar la relación existente entre la frecuencia espacial y la excentricidad en la región V1 del cerebro. Este estudio proporciona una valiosa base de datos, compuesta por estimaciones de amplitud de respuesta de las activaciones neurales, medidas a través de fMRI, a los diferentes estímulos presentados a los sujetos durante el experimento. Además, se obtuvieron las soluciones de los campos receptivos poblacionales (pRF) de cada sujeto.

En esta sección, se brindará una explicación detallada sobre la naturaleza de los datos recopilados en este estudio.

#### 3.1.1. Amplitudes de respuesta de la activación neuronal

Durante la realización del experimento, se procedió al registro de las respuestas BOLD (Blood Oxygen Level Dependent) de los participantes en respuesta a un conjunto de estímulos de rejilla novedosos . Estos estímulos comprendieron 48 vectores de frecuencia diferentes, distribuidos en 8 fases distintas ( $0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \dots, \frac{7\pi}{4}$ ). Dichos vectores de frecuencia se clasificaron en cinco categorías: angular, radial, espiral hacia adelante, espiral hacia atrás y mixto. Para los primeros cuatro estímulos, se consideraron 10 posibles combinaciones de pares  $(\omega_a, \omega_r)$ , donde  $\omega_a$  representa la frecuencia angular y  $\omega_r$  la frecuencia radial del estímulo, mientras que el último solo abarcó 8 combinaciones posibles (consultar [6] para obtener información más detallada). La frecuencia angular  $\omega_a$  es un número entero que especifica el número de ciclos de rejilla

poner  
imagen

por revolución alrededor de la imagen, y la frecuencia radial  $\omega_r$  especifica el número de radianes por unidad de aumento en  $\ln(r)$ , con  $r$  siendo la excentricidad.

Las amplitudes de respuesta a estos estímulos, se estimaron utilizando la caja de herramientas **GLMdenoise** en el entorno de programación MATLAB. **GLMdenoise** es una herramienta diseñada para mejorar la calidad de los datos de fMRI, eliminando artefactos y ruido, lo que facilita una interpretación más precisa de la actividad neuronal. El algoritmo ajusta una función de respuesta hemodinámica (HRF) específica del observador, estimando las amplitudes de respuesta para cada vértice cortical y cada estímulo mediante 100 ejecuciones de bootstrap. La HRF modela la relación temporal entre la actividad neuronal y los cambios en el flujo sanguíneo en el cerebro.

citar

En consecuencia, se obtuvieron 48 respuestas para cada vóxel (una para cada par único de  $(\omega_a, \omega_r)$ ), y estas respuestas fueron promediadas a lo largo de las ocho fases presentadas en las pruebas. Además, el algoritmo incorpora tres regresores polinomiales (grados 0 a 2) para capturar la tendencia media de la señal y la deriva lenta, así como regresores de ruido derivados de vóxeles cerebrales que no se ajustan adecuadamente mediante el modelo lineal general (GLM).

Estos datos se pueden encontrar en

poner  
enlace

### 3.1.2. pRF

Con el objetivo de obtener información precisa sobre la ubicación y tamaño de los pRF en cada sujeto, se llevó a cabo un experimento de retinotopía independiente.

Los resultados de este mapeo de pRF se integraron con un atlas retinotópico existente desarrollado por Benson et al. (2014) utilizando el método de mapa retinotópico bayesiano propuesto por Benson en 2018. Este enfoque aprovecha la información detallada de la respuesta de los pRF y la estructura de referencia proporcionada por el atlas retinotópico, lo que permite obtener una representación más precisa y confiable de la organización retinotópica en el cerebro de cada sujeto.

citar

citar

Las estimaciones obtenidas mediante el método bayesiano incluyen la excentricidad, el ángulo polar, el tamaño de los pRF y la delimitación de áreas visuales específicas para cada sujeto. Las áreas visuales estimadas abarcan V1, V2, V3, hV4, VO1, VO2, LO1, LO2, TO1, TO2, V3b y V3a.

El método bayesiano se llevó a cabo utilizando la biblioteca **neuropythy** de Python, la cual facilita la manipulación y el análisis de datos neurocientíficos. Los datos están disponibles en

poner  
enlace

## 3.2. Procesamiento de los datos

### 3.2.1. Estimación de período preferido

En el análisis de los datos mencionados, se empleó la modelación propuesta por Broderick para ajustar una curva de sintonización log-normal unidimensional a las estimaciones de amplitud de respuesta neural de cada voxel, con el objetivo de estimar los valores de período preferido de cada voxel.

La ecuación del modelo utilizada es la siguiente:

$$\hat{\beta}_b(w_l) = A_b \cdot \exp\left(\frac{-(\log_2(w_l) + \log_2(p_b))^2}{2\sigma_b^2}\right) \quad (3.1)$$

donde  $\hat{\beta}_b(w_l)$  representa la respuesta BOLD promedio en el intervalo de excentricidad  $b$  a la frecuencia espacial  $w_l$  (en ciclos por grado). Los parámetros del modelo incluyen  $A_b$ , que es la ganancia de respuesta,  $p_b$ , el período preferido que se define como el recíproco de la frecuencia espacial máxima y se determina como la moda de la curva de sintonización, y  $\sigma_b$ , el ancho de banda medido en octavas.

La frecuencia espacial local de un estímulo visual se define como la norma euclidiana del vector de frecuencia  $(\omega_a, \omega_r)$  dividida por la excentricidad  $r$  (3.2), lo que implica que el período espacial local de los estímulos crece linealmente con la excentricidad .

$$w_l(r, \theta) = \frac{\sqrt{w_a^2 + w_r^2}}{r} \quad (3.2)$$

citar  
Brode-  
rick

Para obtener estimaciones robustas de estos parámetros, se realizaron 100 iteraciones de ajuste por sujeto, por clase de estímulo y por excentricidad utilizando el método de bootstrapping. Este enfoque implicó realizar múltiples ajustes utilizando muestras aleatorias con reemplazo de las 12 ejecuciones de fMRI disponibles (una por cada sujeto).

El método de bootstrapping contribuye a la robustez de los resultados al tener en cuenta la variabilidad natural de las respuestas neuronales a lo largo de múltiples repeticiones del experimento. Así, se logra una caracterización detallada de la respuesta de cada voxel, proporcionando información valiosa sobre la frecuencia espacial preferida para diferentes estímulos visuales y en diversas regiones de la excentricidad en el cerebro.

Los módulos necesarios para aplicar esta estimación se encuentran en la carpeta src/spf del repositorio adjunto a este documento.

### 3.2.2. Limpieza de los datos

En la fase de preprocesamiento de los datos obtenidos en el presente estudio, se llevó a cabo una limpieza para garantizar la confiabilidad y validez de las mediciones.

Se tomaron en consideración dos variables particulares de gran importancia en el análisis: la excentricidad y el período preferido de los voxels.

Existen evidencias en la literatura que sugieren que valores extremadamente grandes o pequeños de excentricidad pueden no ser confiables en estudios neurocientíficos. Por tanto, se restringió el análisis a vóxeles cuya excentricidad se encontraba en un rango entre 1 y 6 unidades. Esta restricción tiene como objetivo mejorar la fiabilidad de las mediciones al excluir valores que podrían introducir sesgos o errores en el análisis.

Para los datos de período preferido de los voxels, se aplicó una transformación logarítmica con el propósito de abordar posibles asimetrías en la distribución y reducir la escala de los datos. Además, se llevó a cabo un filtrado al considerar únicamente aquellos valores cuyo logaritmo era mayor que -6. Esta decisión se basa en la necesidad de excluir valores extremadamente pequeños, que podrían afectar la estabilidad numérica del análisis y no aportarían significativamente a la comprensión de la respuesta neuronal. Esta estrategia también contribuye a manejar posibles datos atípicos que podrían influir negativamente en la interpretación de los resultados.

### 3.3. Modelo lineal mixto

Con el propósito de validar nuestras hipótesis, (1) que los campos receptivos (pRF) en el hemisferio derecho del cerebro son mayores que en el hemisferio izquierdo, y (2) que la frecuencia espacial preferida de los voxels en el hemisferio derecho es menor que la preferida en el hemisferio izquierdo, se han implementado modelos lineales mixtos. Un modelo lineal mixto es una extensión del modelo lineal que permite tener en cuenta tanto efectos fijos como aleatorios en los datos. En esta sección, se detallarán los aspectos fundamentales de la formulación de los modelos diseñados para la evaluación de cada una de las hipótesis planteadas.

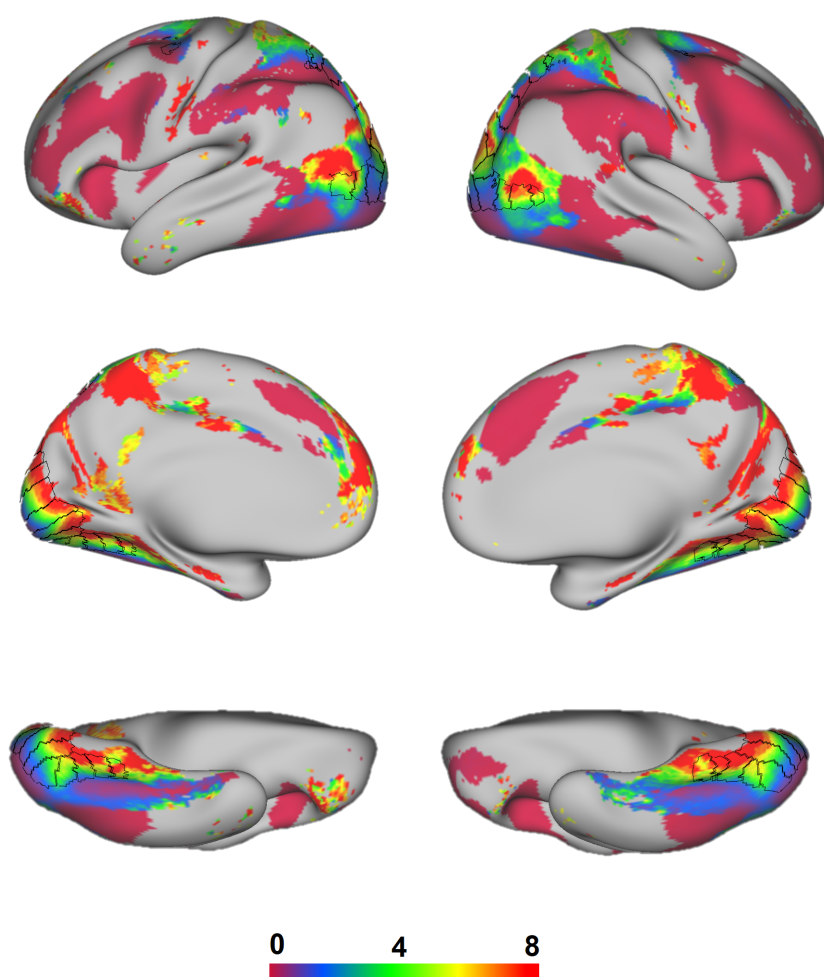
# Capítulo 4

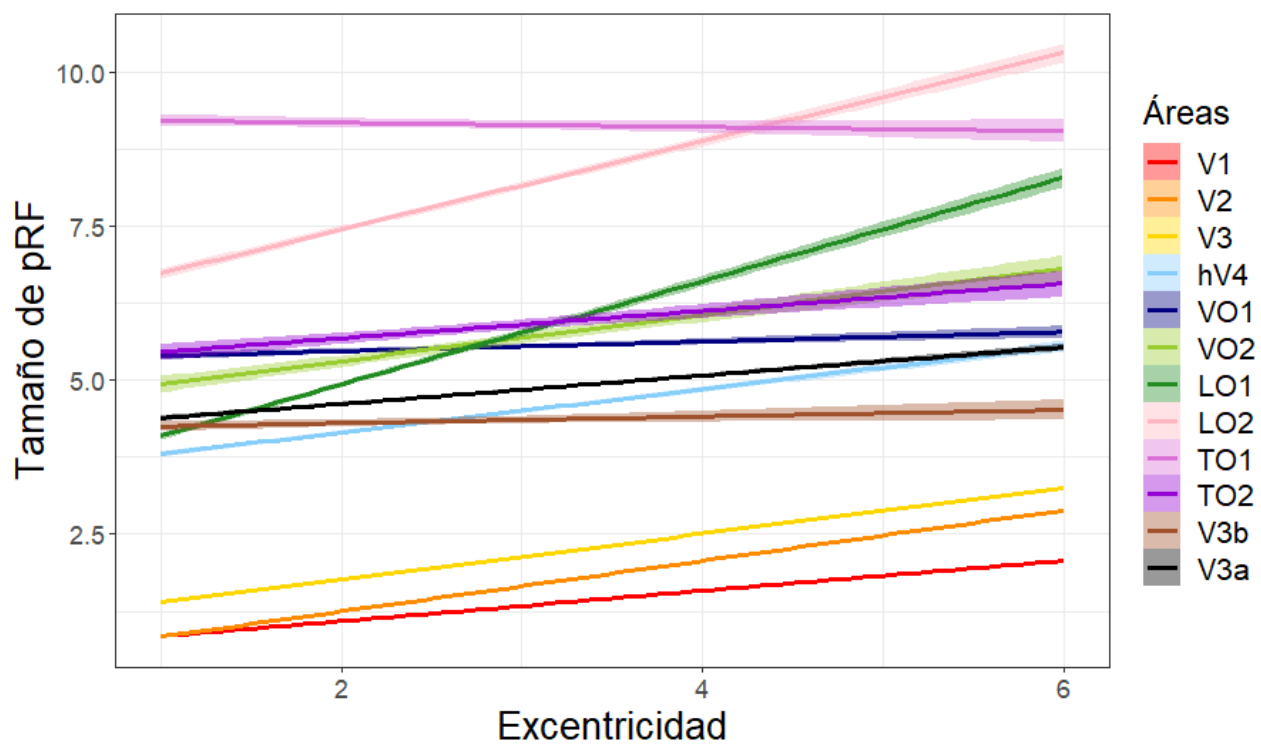
## Resultados

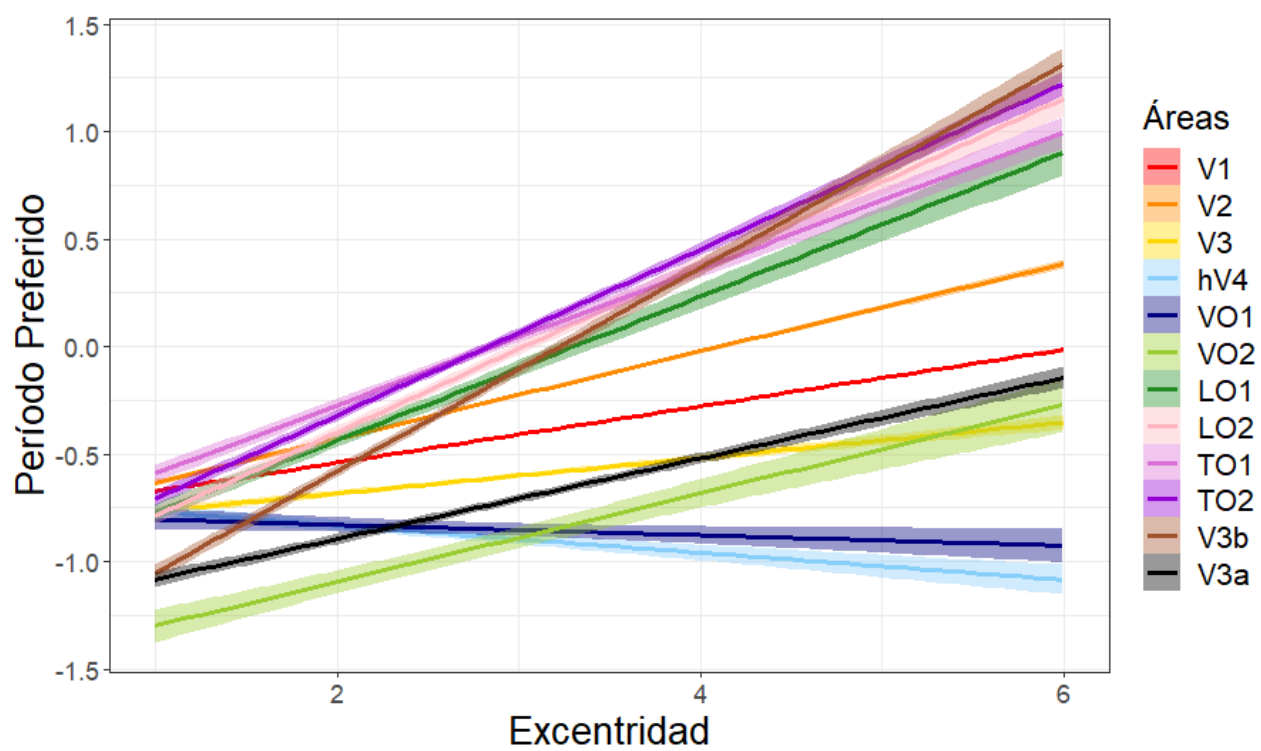
### 4.1.

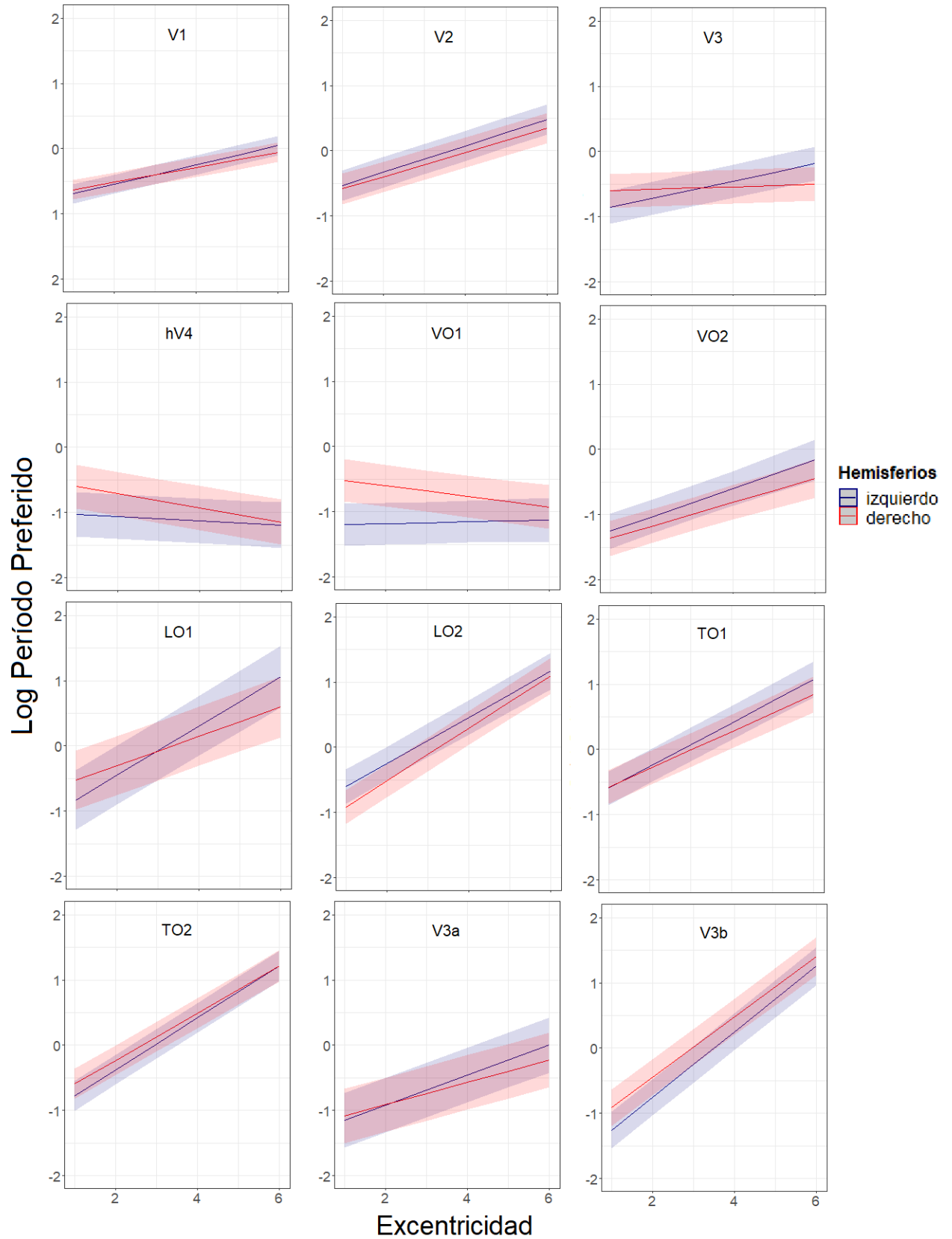
- El sigma aumenta con la excentricidad, mayor en areas superiores
- el periodo aumenta con la excentricidad, pendiente aumenta a medida que aumenta areas en la via visual
- destacar relación en figura ?? en áreas hV4 y VO1 que son las que mayor efecto de lado muestran
- En el modelo lineal mixto que se aplico, se encontró que el efecto de tamaño del efecto de los sigma era significativo, comprobándose que el tamaño de los pRF en el hemisferio derecho es mayor que en el hemisferio izquierdo.
- Se utilizó un modelo lineal mixto para comprobar el efecto del lado en la preferencia de periodo de los voxels y se concluyo que en áreas visuales como ... el hemisferio derechos procesa mejor frecuencias espaciales bajas y el hemisferio izquierdo frecuencias espaciales altas.











áreas	Excentricidad				Hemisferio				Excentricidad:Hemisferio			
	Coef	SE	t-val	BF10	Coef	SE	t-val	BF10	Coef	SE	t-val	BF10
V1	0.17	0.00	1,473,856,830.90	Inf	0.00	0.00	0.02	5.4e-12	0.00	0.00	0.45	2.43e-12
V2	0.17	0.00	1,168,971,503.39	Inf	0.00	0.00	0.21	2.76e-11	0.00	0.00	0.66	3.91e-12
V3	0.26	0.00	1,101,299,360.98	Inf	0.00	0.00	0.69	8.94e-12	-0.00	0.00	-0.52	6.69e-12
hV4	0.53	0.00	737,256,553.40	Inf	-0.00	0.00	-0.67	3.64e-11	0.00	0.00	0.44	2.56e-11
VO1	0.69	0.00	661,783,417.01	Inf	0.00	0.00	2.14	5.05e-11	-0.00	0.00	-2.36	6.35e-10
VO2	0.94	0.00	389,884,603.59	Inf	0.00	0.00	1.25	3.19e-10	-0.00	0.00	-1.85	8.69e-10
LO1	0.86	0.00	629,036,721.81	Inf	0.00	0.00	1.23	6.25e-11	-0.00	0.00	-1.40	1.38e-10
LO2	0.75	0.00	501,885,509.29	Inf	-0.00	0.00	-0.49	1.6e-10	-0.00	0.00	-0.09	6.21e-11
TO1	1.37	0.00	565,136,935.05	Inf	-0.00	0.00	-1.43	2.36e-10	0.00	0.00	1.31	3.45e-10
TO2	1.66	0.00	625,169,995.47	Inf	0.00	0.00	1.30	3.45e-10	-0.00	0.00	-1.93	1.05e-09
V3b	0.36	0.00	498,789,980.69	Inf	0.00	0.00	0.78	6.74e-11	-0.00	0.00	-0.31	3.09e-11
V3a	0.36	0.00	720,987,035.66	Inf	0.00	0.00	0.30	4.5e-10	0.00	0.00	0.90	1.81e-11

Figura 4.1: Sigma

áreas	Excentricidad				Lado				Excentricidad:Lado			
	Coef	SE	t-val	BF10	Coef	SE	t-val	BF10	Coef	SE	t-val	BF10
V1	0.15	0.00	67.94	Inf	0.10	0.01	8.96	9.78e-04	-0.03	0.00	-10.94	2.01e+21
V2	0.20	0.00	49.13	Inf	-0.03	0.02	-1.75	1.47e+18	-0.02	0.01	-2.88	3.08e-03
V3	0.13	0.01	20.97	1.06e+60	0.36	0.03	12.99	3.3e+00	-0.11	0.01	-12.26	3.3e+28
hV4	-0.03	0.01	-2.32	9.71e+08	0.50	0.05	9.81	1.37e+35	-0.08	0.02	-4.09	1.21e+00
VO1	0.01	0.02	0.94	4.66e-04	0.77	0.07	11.28	1.89e+63	-0.10	0.02	-4.27	3.71e+00
VO2	0.22	0.03	8.16	7.53e+22	-0.07	0.11	-0.66	4.37e-01	-0.04	0.04	-1.00	1.82e-03
LO1	0.38	0.02	19.62	2.19e+109	0.45	0.06	7.44	4.35e+00	-0.15	0.02	-6.15	7.96e+04
LO2	0.35	0.02	21.09	8.32e+256	-0.36	0.06	-6.07	2.01e+13	0.05	0.02	2.25	5.71e-03
TO1	0.33	0.01	26.04	1e+208	0.07	0.06	1.19	8.28e-03	-0.05	0.02	-2.55	1.27e-02
TO2	0.40	0.01	39.02	Inf	0.22	0.05	4.38	4.65e+02	-0.04	0.02	-2.23	4.38e-03
V3b	0.50	0.01	34.16	Inf	0.38	0.06	6.96	2.42e+23	-0.04	0.02	-1.97	2.54e-03
V3a	0.23	0.01	21.32	4.42e+158	0.13	0.05	2.70	2.71e-03	-0.06	0.01	-4.06	6.58e-01

Figura 4.2: PP

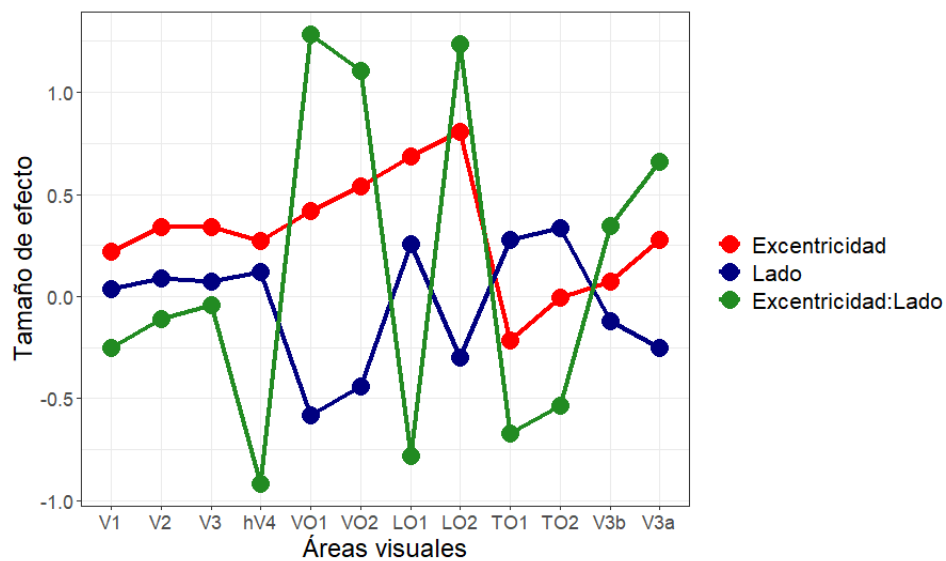


Figura 4.3: sigma

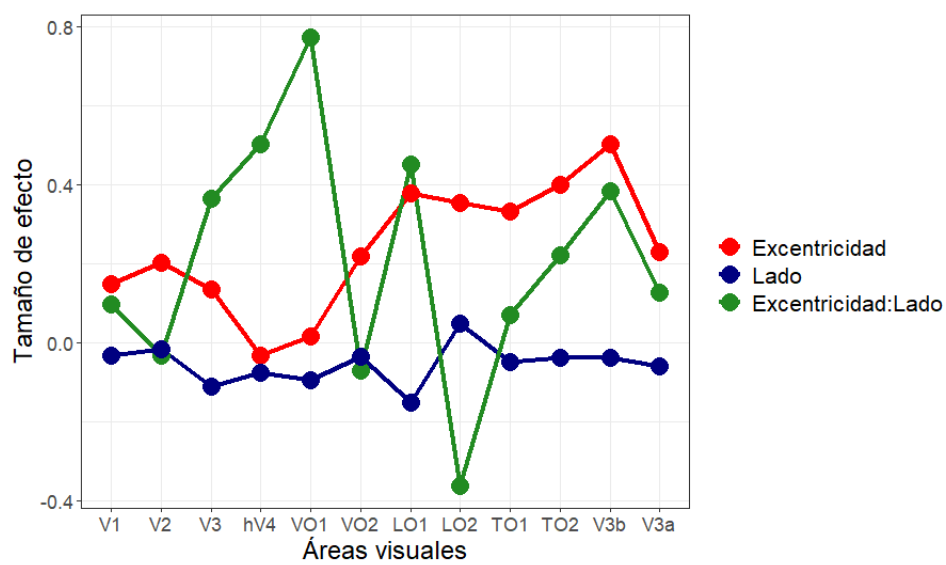


Figura 4.4: pp

# Capítulo 5

## Discusión

Se confirma que el tamaño de pRF de áreas corticales visuales crece con la excentricidad, y la pendiente de este crecimiento es mayor a medida que se avanza en dirección posterior - anterior en la vía visual. Se confirmó. Además que el período preferido de vértices corticales en áreas visuales crece con su excentricidad. Como hallazgo novedoso, se encontró

Encontramos una relación directa entre el período preferido y la excentricidad.

Encontramos que en cuatro áreas visuales (hV4, VO1, TO2, V3b) el período preferido de los vértices corticales era mayor en el hemisferio derecho que en el hemisferio izquierdo. El hemisferio derecho prefiere frecuencias espaciales más bajas que el hemisferio izquierdo. Este efecto no apareció en áreas visuales primarias (V1-V3) y algunas áreas de orden superior (ej. LO2).

También se demostró que el tamaño de áreas visuales de los pRF es mayor en el hemisferio derecho

Esto sugiere que la representación de las imágenes visuales en algunas áreas corticales difiere en áreas superiores.

Muy pocos estudios han examinado la diferencia entre campos receptivos del hemisferio izq-der. Los pocos que lo han hecho se han centrado en áreas primarias y al igual que nosotros no encuentran diferencias. Los pocos trabajos que han examinado frecuencias espaciales no han comparado hemisferios. Este trabajo es el primer trabajo conocido que halla analizado la diferencia de frecuencias espaciales en ambos hemisferios.

Las estimaciones de pRF parecen más ruidosas que las de preferencia por sf. Esto se ve en  $R^2$  de las dos variables. Lage y Castellano ha discutido las dificultades que existen en estimar con dificultad el tamaño de pRF.

Los resultados son consistentes con los datos neurocognitivos y neurofisiológicos y neuróficos sobre lateral hemis, que coinciden en una ventaja del hemisferio derecho para lo global (sf) y de lo local para hem.izq esta idea se postula en la idea de doble



filtraje de Robertson sin especificar posibles circuitos neurales, nuestro analisis sugiere que este mecanismo podría surgir de las propiedades discrepantes de los campos receptivos de los dos hemisferios.

Simulaciones con redes neurales convolucionales profundas realizadas en CNEURO, que fueron entrenadas para reconocer letras, (Garea) apoyan esta idea, estas redes se contruyeron con multiples canales que diferian en el tamaño y la selectividad en frecuencia de filtros de Gabor como primer paso del procesamiento de imagenes. Los filtros de gabor son el mejor modelo para describir el campo receptivo de celulas visuales o poblaciones neuronales. Cuando se entrena esta redes para discriminar objetos que tienen niveles globales y locales, eliminar los filtros de baja frecuencia impide la percepción de letras locales. Seria interesante construir redes incorporando los parametros medidos en este estudio y hacer una sim mas realista.

La teoria del doble filtraje presupone un ajuste del rango de frecuencias en que se trabaja segun el tipo de estimulo al que enfrenta el sujeto. Los sujetos miraban estimulos pequenos centrados en la fovea, es necesario cambiar esto para ver si la preferencia de sf varia. Se sabe que las propiedades de los campos receptivos cambian de acuerdo a la atencion

El estudio ofrece la primera propuesta de un modelo para explicar especializacion hemi de la percepcion glo/local y la primeras clave para la implementacion de RNN

# Conclusiones

Conclusiones

# Recomendaciones

Recomendaciones

# Bibliografía

- [1] Sara Aghajari, Louis N. Vinke y Sam Ling. «Population spatial frequency tuning in human early visual cortex». en. En: *Journal of Neurophysiology* 123.2 (feb. de 2020), págs. 773-785. ISSN: 0022-3077, 1522-1598. DOI: 10.1152/jn.00291.2019. URL: <https://www.physiology.org/doi/10.1152/jn.00291.2019> (visitado 26-11-2023) (vid. págs. 2, 7).
- [2] Kaoru Amano, Brian A. Wandell y Serge O. Dumoulin. «Visual Field Maps, Population Receptive Field Sizes, and Visual Field Coverage in the Human MT+ Complex». en. En: *Journal of Neurophysiology* 102.5 (nov. de 2009), págs. 2704-2718. ISSN: 0022-3077, 1522-1598. DOI: 10.1152/jn.00102.2009. URL: <https://www.physiology.org/doi/10.1152/jn.00102.2009> (visitado 26-11-2023) (vid. pág. 6).
- [3] Noah C Benson y Jonathan Winawer. «Bayesian analysis of retinotopic maps». en. En: *eLife* 7 (dic. de 2018), e40224. ISSN: 2050-084X. DOI: 10.7554/eLife.40224. URL: <https://elifesciences.org/articles/40224> (visitado 17-08-2023) (vid. pág. 5).
- [4] Noah C. Benson et al. «The Human Connectome Project 7 Tesla retinotopy dataset: Description and population receptive field analysis». en. En: *Journal of Vision* 18.13 (dic. de 2018), pág. 23. ISSN: 1534-7362. DOI: 10.1167/18.13.23. URL: <http://jov.arvojournals.org/article.aspx?doi=10.1167/18.13.23> (visitado 01-09-2023) (vid. págs. 6, 7).
- [5] Noah C. Benson et al. «The Retinotopic Organization of Striate Cortex Is Well Predicted by Surface Topology». en. En: *Current Biology* 22.21 (nov. de 2012), págs. 2081-2085. ISSN: 09609822. DOI: 10.1016/j.cub.2012.09.014. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960982212010779> (visitado 17-08-2023) (vid. pág. 5).
- [6] William F. Broderick, Eero P. Simoncelli y Jonathan Winawer. «Mapping spatial frequency preferences across human primary visual cortex». en. En: *Journal of Vision* 22.4 (mar. de 2022), pág. 3. ISSN: 1534-7362. DOI: 10.1167/jov.22.4.

3. URL: <https://jov.arvojournals.org/article.aspx?articleid=2778653> (visitado 21-11-2023) (vid. págs. 2, 7, 18).
- [7] Serge O. Dumoulin y Brian A. Wandell. «Population receptive field estimates in human visual cortex». eng. En: *NeuroImage* 39.2 (ene. de 2008), págs. 647-660. ISSN: 1053-8119. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2007.09.034 (vid. págs. 6, 14-16).
- [8] Anastasia V. Flevaris y Lynn C. Robertson. «Spatial frequency selection and integration of global and local information in visual processing: A selective review and tribute to Shlomo Bentin». en. En: *Neuropsychologia* 83 (mar. de 2016), págs. 192-200. ISSN: 00283932. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2015.10.024. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0028393215302001> (visitado 24-10-2023) (vid. págs. 1, 4).
- [9] L. Henriksson et al. «Spatial frequency tuning in human retinotopic visual areas». en. En: *Journal of Vision* 8.10 (ago. de 2008), págs. 5-5. ISSN: 1534-7362. DOI: 10.1167/8.10.5. URL: <http://jov.arvojournals.org/Article.aspx?doi=10.1167/8.10.5> (visitado 31-12-2023) (vid. págs. 7).
- [10] Marc M. Himmelberg et al. «Cross-dataset reproducibility of human retinotopic maps». en. En: *NeuroImage* 244 (dic. de 2021), pág. 118609. ISSN: 10538119. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2021.118609. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S105381192100882X> (visitado 27-10-2023) (vid. pág. 6).
- [11] Kendrick N. Kay. «Understanding Visual Representation by Developing Receptive-Field Models». en. En: *Visual Population Codes*. Ed. por Nikolaus Kriegeskorte y Gabriel Kreiman. The MIT Press, oct. de 2011, págs. 133-162. ISBN: 978-0-262-30357-6. DOI: 10.7551/mitpress/8404.003.0009. URL: <https://direct.mit.edu/books/book/2176/chapter/57847/Understanding-Visual-Representation-by-Developing> (visitado 27-10-2023) (vid. pág. 7).
- [12] Kendrick N. Kay, Kevin S. Weiner y Kalanit Grill-Spector. «Attention Reduces Spatial Uncertainty in Human Ventral Temporal Cortex». en. En: *Current Biology* 25.5 (mar. de 2015), págs. 595-600. ISSN: 09609822. DOI: 10.1016/j.cub.2014.12.050. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960982214016534> (visitado 31-12-2023) (vid. pág. 6).
- [13] Kendrick N. Kay et al. «Compressive spatial summation in human visual cortex». En: *Journal of Neurophysiology* 110.2 (jul. de 2013). Publisher: American Physiological Society, págs. 481-494. ISSN: 0022-3077. DOI: 10.1152/jn.00105.2013. URL: <https://journals.physiology.org/doi/full/10.1152/jn.00105.2013> (visitado 01-09-2023) (vid. pág. 6).

- [14] David Navon. «Forest before trees: The precedence of global features in visual perception». en. En: *Cognitive Psychology* 9.3 (jul. de 1977), págs. 353-383. ISSN: 00100285. DOI: 10.1016/0010-0285(77)90012-3. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0010028577900123> (visitado 31-12-2023) (vid. pág. 4).
- [15] D. Samuel Schwarzkopf et al. «Larger Extrastriate Population Receptive Fields in Autism Spectrum Disorders». en. En: *The Journal of Neuroscience* 34.7 (feb. de 2014), págs. 2713-2724. ISSN: 0270-6474, 1529-2401. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.4416-13.2014. URL: <https://www.jneurosci.org/lookup/doi/10.1523/JNEUROSCI.4416-13.2014> (visitado 28-12-2023) (vid. pág. 6).
- [16] Brian A. Wandell y Jonathan Winawer. «Computational neuroimaging and population receptive fields». en. En: *Trends in Cognitive Sciences* 19.6 (jun. de 2015), págs. 349-357. ISSN: 13646613. DOI: 10.1016/j.tics.2015.03.009. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364661315000704> (visitado 17-08-2023) (vid. pág. 6).
- [17] Brian A. Wandell y Jonathan Winawer. «Imaging retinotopic maps in the human brain». en. En: *Vision Research* 51.7 (abr. de 2011), págs. 718-737. ISSN: 00426989. DOI: 10.1016/j.visres.2010.08.004. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0042698910003780> (visitado 30-12-2023) (vid. pág. 5).
- [18] Lauren E. Welbourne, Antony B. Morland y Alex R. Wade. «Population receptive field (pRF) measurements of chromatic responses in human visual cortex using fMRI». en. En: *NeuroImage* 167 (feb. de 2018), págs. 84-94. ISSN: 10538119. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2017.11.022. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1053811917309291> (visitado 30-12-2023) (vid. pág. 6).
- [19] J. Winawer et al. «Mapping hV4 and ventral occipital cortex: The venous eclipse». en. En: *Journal of Vision* 10.5 (mayo de 2010), págs. 1-1. ISSN: 1534-7362. DOI: 10.1167/10.5.1. URL: <http://jov.arvojournals.org/Article.aspx?doi=10.1167/10.5.1> (visitado 30-12-2023) (vid. pág. 6).
- [20] W. Zuiderbaan, B. M. Harvey y S. O. Dumoulin. «Modeling center-surround configurations in population receptive fields using fMRI». en. En: *Journal of Vision* 12.3 (mar. de 2012), págs. 10-10. ISSN: 1534-7362. DOI: 10.1167/12.3.10. URL: <http://jov.arvojournals.org/Article.aspx?doi=10.1167/12.3.10> (visitado 31-12-2023) (vid. pág. 6).