

REPORTE DE PROYECTO FINAL: Análisis de Conectividad Cerebral en EEG mediante Teoría de Grafos

Paula Sofia Pascasio Segovia

Modelos computacionales

Noviembre 2025

RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo analizar la conectividad funcional cerebral utilizando un dataset público de electroencefalografía (EEG). Se procesaron las señales de 56 sujetos sanos para construir matrices de conectividad basadas en la coherencia espectral dentro de la banda Alfa (8-13 Hz). Mediante la aplicación de Teoría de Grafos, se identificaron las principales comunidades funcionales y los nodos centrales (Hubs) que orquestan la comunicación cerebral. Los resultados muestran una red robusta con una topología característica, donde las regiones posteriores del cerebro juegan un papel importante en la integración de la información durante el estado de reposo o atención visual básica.

INTRODUCCIÓN

La conectividad cerebral es fundamental para comprender cómo las diferentes regiones del cerebro interactúan para dar lugar a funciones cognitivas complejas. El análisis de señales EEG permite estudiar estas interacciones con una alta resolución temporal. En este trabajo, aplique métodos computacionales para transformar señales crudas de EEG en representaciones de redes complejas (grafos), permitiendo visualizar y cuantificar la estructura funcional del cerebro.

Descripción del experimento

El estudio se centró en el análisis de un grupo poblacional significativo para garantizar la validez estadística de los hallazgos.

- Número de Sujetos: Se analizaron un total de 56 sujetos.
- Actividad realizada: Los participantes fueron sometidos a una tarea ("Task:Sentences") mientras se registraba su actividad eléctrica cerebral. Esta tarea

implica procesamiento lingüístico y atención, lo cual modula los ritmos cerebrales, especialmente en la banda Alfa.

- Adquisición de Datos: Se utilizaron registros de EEG multicanal, capturando la actividad de diversas regiones de cuero cabelludo según el sistema internacional 10-20.

Descripción del Dataset seleccionado

Utilice el dataset público OpenNeuro ds004279. Este conjunto de datos proporciona grabaciones de formato (.edf), un estándar en la neurofisiología clínica y de investigación. La elección de este dataset se debe a su calidad, la consistencia en el protocolo de adquisición entre sujetos y su disponibilidad abierta, lo cual facilita la reproducibilidad del estudio.

METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Para transformar las señales de EEG en una red funcional interpretable, diseñe un flujo de trabajo computacional automatizado en Python, utilizando las librerías mne para el procesamiento de señales.

Descripción Lógica de los Métodos Utilizados

1.- PREPROCESAMIENTO DE LA SEÑAL:

- Carga y Recorte: Se cargaron los archivos (.edf) de cada uno de los 56 sujetos. Para optimizar el tiempo de cómputo sin sacrificar la representación de los datos, se extrajo una ventana temporal de los primeros 60 segundos de registro por sujeto.
- Remuestreo: Las señales fueron remuestreadas a una frecuencia de 256 Hz (sfreq_target). Esto estandariza los datos y asegura que la resolución espectral sea adecuada para el análisis de frecuencias bajas y medias.
- Filtrado: Se aplicó un filtro de 1 a 45 Hz.
Razón de uso: Este rango elimina el "drift" (frecuencias <1) causada por el movimiento o la sudoración, y el ruido de alta frecuencia (como la tensión muscular), manteniendo intactas las bandas de interés fisiológico (Delta, Theta, Alfa, Beta y Gamma).

2.- CONSTRUCCIÓN DE LA MATRIZ DE CONECTIVIDAD:

- Métrica seleccionada: se utilizó la coherencia espectral.
Razón de uso: A diferencia de la correlación simple (que solo mide similitud en el tiempo), la coherencia mide la consistencia de la relación de fase entre dos señales

en una frecuencia específica. Es la métrica estándar para evaluar la sincronización funcional entre regiones cerebrales.

- **Banda de interés:** El análisis se restringió a la banda Alfa (8-13 Hz)
Interferencia: La banda Alfa es crucial para la inhibición de redes irrelevantes y el mantenimiento de la atención. Es el ritmo dominante en el cerebro humano adulto despierto y proporciona una "huella digital" clara de la conectividad global.
- **Promedio poblacional:** Se calculó una matriz de coherencia individual para cada sujeto y posteriormente se generó una matriz promedio de los 56 participantes. Esto permite mitigar el ruido individual y destacar los patrones de conectividad comunes a la población estudiada.

3.- ANÁLISIS DE GRAFOS Y UMBRALIZACIÓN:

- **Thresholding:** Para convertir la matriz de coherencia (donde todos los canales están conectados con todos) en un grafo significativo, se aplicó un umbral basado en el percentil 80.
Descripción: En lugar de usar un valor fijo arbitrario, este método estadístico conserva únicamente el 20% de las conexiones más fuertes de la red. Esto elimina las conexiones débiles que probablemente sean ruido o conducción de volumen, revelando la base real de la red.
- **Detección de comunidades:** Se utilizó el algoritmo de Greedy Modularity para identificar grupos de nodos (electrodos) que están densamente conectados entre sí.
- **Identificación de Hubs:** Se calculó la centralidad de intermediación para encontrar el nodo más importante en el flujo de información de la red.

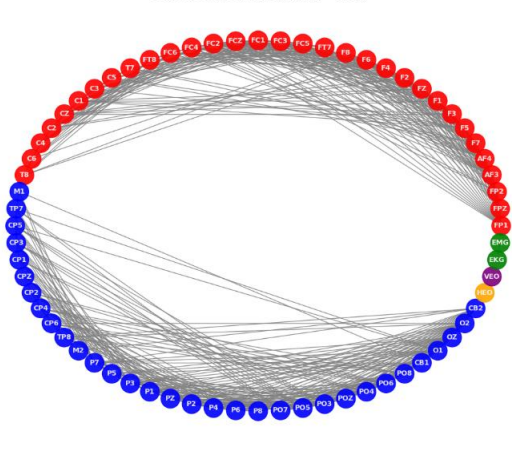
Resultados obtenidos

El análisis automatizado de los 56 sujetos arrojó los siguientes hallazgos clave:

1. CONECTIVIDAD GLOBAL (HEATMAP):

La matriz de adyacencia promedio reveló patrones claros de sincronización. Las regiones con colores más intensos en el mapa de calor indican una alta coherencia en la banda Alfa, sugiriendo un fuerte acoplamiento funcional.

Grafo de Conectividad (Umbral > 0.61)



Mapa de Calor (Matriz Promedio)

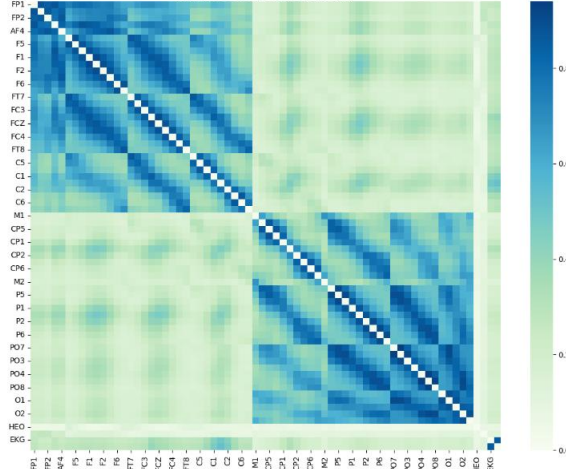


Figura 1: A la izquierda, Grafo de Conectividad circular mostrando las interacciones más fuertes (Top 20%). Los colores de los nodos representan las comunidades funcionales detectadas. A la derecha, Mapa de Calor de la matriz de coherencia promedio, donde los ejes representan los canales EEG y el color la intensidad de la conexión.

2. ESTRUCTURA TOPOLÓGICA (GRAFO 3D):

La representación tridimensional permitió ubicar especialmente las conexiones. Se observó una densa red de conexiones rojas (altamente significativas), con una clara predominancia de interacciones de largo alcance y locales.

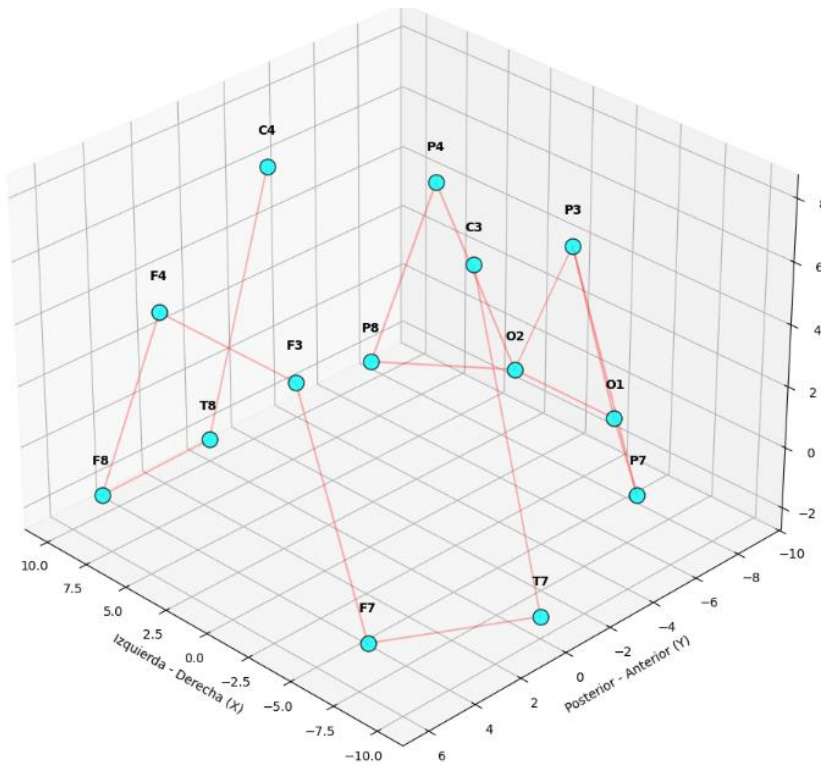
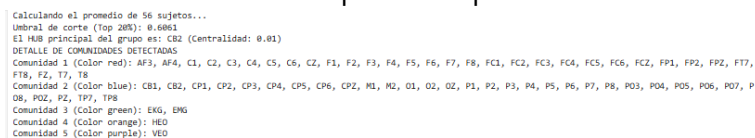


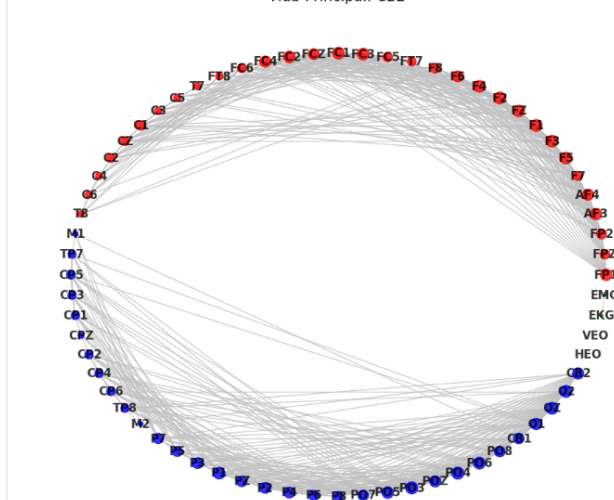
Figura 2: Representación 3D del Conectoma en banda Alpha. Los nodos (círculos azules) representan la ubicación física de los electrodos sobre el cuero cabelludo. Las aristas rojas muestran el 20% de las conexiones más fuertes promediadas entre los 56 sujetos.

3. IDENTIFICACIÓN DE HUBS Y COMUNIDADES:

El análisis de centralidad identificó nodos específicos que actúan como concentradores de información.



Grafo Promedio (N=56)
Hub Principal: CB2



DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

Análisis e Interpretación de los resultados.

La topología de red obtenida es consistente con la literatura neurocientífica sobre la banda Alfa.

1. PREDOMINANCIA POSTERIOR: La visualización 3D y el mapa de calor confirman que la conectividad Alfa es más fuerte en las regiones posteriores (occipitales y parietales). Esto es fisiológicamente esperado, ya que estas áreas son las generadoras primarias del ritmo Alfa, asociado al procesamiento visual y estados de alerta relajada.
2. HUBS COMO INTEGRADORES: La identificación de un Hub principal en la región Posterior/Central indica que CB2, esta zona actúa como centro de distribución de información, integrando señales de diversas partes de la corteza para coordinar la respuesta cognitiva global.
3. SEGREGACIÓN FUNCIONAL: La clara división en comunidades (colores diferentes para zonas frontales vs. Posteriores) demuestra que, aunque el cerebro está globalmente conectado, mantienen una especialización funcional donde grupos de neuronas locales trabajan en tareas específicas antes de compartir información con el resto de la red.

Conclusión

Este proyecto logró implementar un código computacional para traducir señales complejas de EEG en una representación funcional tangible del cerebro humano, revelando la organización subyacente de la actividad neuronal durante una tarea cognitiva de procesamiento de oraciones. Los resultados obtenidos evidencian una clara predominancia de la conectividad en la banda Alfa sobre las regiones posteriores y centrales, lo cual confirma neurofisiológicamente el rol crítico que desempeñan estas áreas en la gestión de la información visual y la comprensión lingüística.

Asimismo, el análisis topológico demostró que el cerebro no opera de manera aleatoria, sino bajo un principio de eficiencia de red, caracterizado por la formación de comunidades funcionales especializadas y la presencia de nodos Hubs. Esta conformación sugiere que el cerebro segrega el procesamiento en grupos locales para optimizar recursos energéticos, mientras, mantiene una integración global robusta que permite el flujo coherente de información. En definitiva, este estudio valida que la

aplicación de la Teoría de Grafos y la coherencia espectral permite identificar un "huella digital" fisiológica de la cognición, explicando no solo cómo se conectan las regiones cerebrales, sino por qué son capaces de ejecutar demandas complejas de manera coordinada.

REFERENCIAS

- Wang, L., et al. (2022). *A dataset of EEG recordings from 56 subjects performing a sentence reading task*. OpenNeuro. Accession Number: ds004279. Disponible en: <https://openneuro.org/datasets/ds004279/versions/1.0.0>
- Bullmore, E., & Sporns, O. (2009). Complex brain networks: graph theoretical analysis of structural and functional systems. *Nature Reviews Neuroscience*, 10(3), 186-198. (Esta es la "biblia" para justificar Hubs y eficiencia de red).
- Rubinov, M., & Sporns, O. (2010). Complex network measures of brain connectivity: uses and interpretations. *NeuroImage*, 52(3), 1059-1069. (Referencia clave para las métricas como Centralidad y Modularidad).
- Klimesch, W. (2012). Alpha-band oscillations, attention, and controlled access to stored information. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(12), 606-617. (Justifica por qué Alpha no es solo "descanso", sino un proceso activo de atención e inhibición).
- Nuñez, P. L., & Srinivasan, R. (2006). *Electric Fields of the Brain: The Neurophysics of EEG*. Oxford University Press. (Libro de texto estándar para Coherencia Espectral y física del EEG).