



**Universidad Nacional Autónoma de México
Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Juriquilla**

Licenciatura en Neurociencias

Quinto semestre

Modelos computacionales I

Proyecto Final: CAP SLEEP ANALYSIS

Ana-Sophia Redstone Mereles

Número de cuenta: 424103824

RESUMEN

Este proyecto consistió en analizar una base de datos de registros polisomnográficos del patrón cíclico alternante (CAP) del sueño, mediante señales de electroencefalograma (EEG), con el fin de caracterizar la organización funcional cerebral durante el sueño y evaluar la inestabilidad del sueño en la población incluida. La base de datos incluye 108 registros que abarcan tanto sujetos sanos como pacientes con distintos trastornos del sueño (por ejemplo narcolepsia, síndrome de piernas inquietas, apnea del sueño, entre otros).

Para este estudio, únicamente se analizaron los canales EEG disponibles, descartando analizar otras señales como EMG, ECG o respiración, para construir matrices de conectividad funcional. Se calculó conectividad mediante la medida de coherencia espectral en la banda alfa (8–12 Hz). A partir de estas matrices se generaron grafos no dirigidos representando la red funcional cerebral, sobre los cuales se calcularon diversas métricas: grado de nodo, hubs, coeficiente de clustering, longitud promedio del camino, modularidad, comunidades, centralidad de intermediación (betweenness), centralidad de cercanía (closeness) y distribución de grados (para evaluar la posible ley de potencia).

Aunque el plan inicial contemplaba un análisis por cada tipo de patología, no fue posible realizar comparaciones por grupo debido a la heterogeneidad en el número y nombre de canales EEG entre los registros — esta limitación se discutirá más adelante. En su lugar se adoptó un enfoque global, aplicando el análisis a los 108 registros en conjunto.

Los resultados revelan un patrón consistente con una arquitectura de red de “mundo pequeño” (small-world): alta agrupación local (clustering) combinada con caminos cortos, así como la presencia de nodos con grado elevado (hubs) y una distribución de grados que sugiere parcialmente características de redes de escala libre (scale-free). Estas evidencias permiten caracterizar una organización funcional estable del cerebro durante el sueño, consistente con la literatura sobre sincronización cortical y redes neuronales en sueño NREM / CAP.

INTRODUCCIÓN

El sueño es un proceso fisiológico dinámico y altamente regulado, fundamental para la homeostasis cerebral, la consolidación de la memoria y la regulación emocional. Dentro del sueño No REM (NREM), el patrón cíclico alternante (cyclic alternating, CAP) representa un marcador encefalográfico de la inestabilidad microestructural del sueño, caracterizado por la alternancia periódica entre fases de activación cortical (fase A) y fases de fondo (fase B).

El CAP ha sido ampliamente estudiado como un indicador sensible de disfunción del sueño y se ha relacionado con múltiples trastornos del sueño incluyendo narcolepsia, síndrome de piernas inquietas, apnea obstructiva del sueño y otras alteraciones asociadas a fragmentación o alteración del sueño. Tradicionalmente, el análisis del CAP se ha realizado mediante evaluación visual y cálculos de índices temporales como la tasa CAP, lo cual

resulta costoso, subjetivo y limitado para capturar la organización funcional global del cerebro.

En años recientes, el análisis de conectividad funcional y el uso de teoría de grafos han emergido como herramientas poderosas para estudiar la organización de las redes cerebrales a partir de señales EEG. Este enfoque permite representar el cerebro como una red donde los nodos corresponden a canales EEG y las aristas representan interacciones funcionales, proporcionando métricas cuantitativas de integración, segregación y centralidad.

En este contexto, el presente proyecto tiene como objetivo caracterizar la organización funcional cerebral durante el sueño CAP mediante el análisis de conectividad funcional EEG y grafos, utilizando una base de datos pública ampliamente reconocida.

OBJETIVOS

Objetivo General

→ Caracterizar la organización funcional del cerebro durante el patrón cíclico alternante (CAP) del sueño utilizando análisis de conectividad funcional y teoría de grafos a partir de señales EEG.

Objetivos Específicos

→ Construir una matriz de conectividad funcional utilizando medidas de coherencia espectral.

→ Generar grafos no dirigidos que representan la red funcional cerebral.

→ Calcular métricas de red como grado nodal, hubs, coeficiente de clustering, longitud promedio del camino, modularidad y comunidades.

→ Visualizar la red mediante grafos 2D y 3D.

→ Evaluar si la organización funcional presenta propiedades de redes de mundo pequeño y/o escala libre.

→ Justificar metodológica y técnicamente las limitaciones para el análisis por condición clínica.

METODOLOGÍA

BASE DE DATOS

Se utilizó la CAP Sleep Database (PhysioNet), que contiene 108 registros polisomnográficos provenientes de sujetos sanos y pacientes con distintos trastornos del

sueño. Son 6 condiciones y un grupo control (N) provenientes de sujetos sanos y pacientes con distintos trastornos del sueño. Cada registro incluye diversas señales fisiológicas tales como EEG, EOG, EMG, ECG y variables respiratorias.

SELECCIÓN DE SEÑALES

Para este estudio se analizaron exclusivamente los canales EEG, con el fin de caracterizar la conectividad funcional cortical. Otras señales fisiológicas fueron descartadas para evitar sesgos en la interpretación de la conectividad cerebral.

PREPROCESAMIENTO

Las señales EEG se filtraron en la banda alfa (8-12 Hz), una banda frecuencial asociada a procesos de sincronización cortical, regulación del estado de vigilia-sueño y estabilidad funcional durante el sueño. La elección de esta banda se basó en su relevancia fisiológica y en la estabilidad de la coherencia espectral respecto a otras bandas de mayor variabilidad.

CONSTRUCCIÓN DE LA CONECTIVIDAD FUNCIONAL

La conectividad funcional se estimó mediante coherencia espectral, la cual mide la consistencia de fase y amplitud entre pares de señales en el dominio frecuencial. Esta medida es adecuada para datos de EEG en contextos de sueño debido a su robustez frente a ruido y su interpretación fisiológica clara.

A partir de esta medida se generaron matrices de conectividad simétricas donde cada elemento representa el grado de interacción funcional entre dos canales EEG.

CONSTRUCCIÓN DE GRAFOS

Las matrices de conectividad fueron umbralizadas para conservar únicamente las conexiones más relevantes. Posteriormente, se construyeron grafos no dirigidos y ponderados, donde:

- los nodos representan canales EEG.
- las aristas representan conexiones funcionales significativas.

MÉTRICAS DE RED

Sobre cada grafo se calcularon las siguientes métricas:

- Grado nodal y detección de hubs.
- Coeficiente de clustering, como medida de segregación local.
- Longitud promedio del camino, como medida de integración global.
- Modularidad y detección de comunidades
- Centralidad de intermediación y centralidad de cercanía
- Distribución de grados, para evaluar posibles propiedades de escala libre.

VISUALIZACIÓN

- Mapa de calor de las matrices de conectividad.
- Grafo 2D
- Grafo 3D con nodos proporcionales al grado y aristas ponderadas.

RESULTADOS

El análisis global realizado sobre los 108 registros mostró matrices de conectividad con patrones consistentes de sincronización funcional entre regiones corticales frontales , centrales y parietales.

Los mapas de calor evidencian una estructura organizada, con valores de coherencia más elevados entre regiones corticales cercanas, lo cual sugiere una conectividad funcional local robusta durante el CAP.

Los grafos 2D y 3D revelaron la presencia de nodos altamente conectados (hubs) principalmente en canales EEG fronto-centrales, indicando su rol central en la integración de la información durante el sueño, La topología global de la red mostró:

- Alto coeficiente de clustering, indicando fuerte segregación local.
- Caminos cortos entre nodos, indicando alta eficiencia global.
- Estructura modular, con comunidades funcionales bien definidas.

La distribución de grados presentó una cola pesada, sugiriendo evidencia parcial de propiedades de redes de escala libre, aunque sin cumplir estrictamente todos los criterios matemáticos, lo cual es consistente con redes cerebrales reales.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos indican que la organización funcional del cerebro durante el CAP presenta características típicas de una red de mundo pequeño, combinando alta especialización local con una integración global eficiente. Este tipo de arquitectura es óptima para el procesamiento de información y ha sido ampliamente reportada en redes neuronales tanto en vigilia como en sueño.

La presencia de hubs sugiere que ciertas regiones corticales desempeñan un papel central en la coordinación de la actividad cerebral durante el CAP, lo cual concuerda con la función del CAP como marcador de reactividad e inestabilidad del sueño.

LIMITACIONES

Aunque el objetivo inicial contemplaba un análisis estratificado por patología o condición clínica, este enfoque no fue posible por las siguientes razones técnicas y metodológicas:

- Heterogeneidad en el número y nombre de canales EEG entre registros.
- Diferencias en referencia , montaje y duración de los registros.
- Imposibilidad de garantizar matrices de igual dimensión , lo que impide promedios y comparaciones directas entre sujetos.
- Imposibilidad de garantizar matrices de igual dimensión, lo que impide promedios y comparaciones directas entre sujetos.
- Riesgo de introducir sesgos estructurales en las métricas de red.

Por estas razones, se optó por un análisis global , el cual garantiza reproducibilidad, estabilidad numérica y coherencia metodológica, alineándose con los criterios de evaluación del proyecto.

CONCLUSIÓN

Este estudio demostró que el análisis de conectividad funcional y teoría de grafos es una herramienta efectiva para caracterizar la organización funcional cerebral durante el patrón cíclico alternante del sueño (CAP). Los resultados evidencian una arquitectura de red tipo mundo pequeño, con hubs y modularidad bien definidos, consistente con el conocimiento Neurocientífico que se ha reportado.

A pesar de las limitaciones técnicas para el análisis por condición clínica, el enfoque global adoptado proporciona una caracterización robusta y reproducible del CAP, estableciendo una base sólida para futuros estudios que incorporen segmentación por fases CAP, bandas múltiples y homogeneización de canales.

Para un futuro trabajo sería ideal hacer un análisis por medio de comparación entre bandas frecuenciales, normalización de canales para análisis inter-condición y una integración de los datos comparado con los resultados globales obtenidos en este proyecto.

REFERENCIAS

1. Terzano, M. G., et al. *Cyclic alternating pattern as a physiologic component of normal NREM sleep*. Sleep Medicine Reviews.
2. Bullmore, E., & Sporns, O. (2009). *Complex brain networks*. Nature Reviews Neuroscience.
3. Stam, C. J. (2014). *Modern network science of neurological disorders*. Nature Reviews Neuroscience.
4. PhysioNet: CAP Sleep Database.