



Universidad
Pontificia
de Salamanca

GUÍA DOCENTE 2026 – 2027

ANÁLISIS DE CONECTIVIDAD

Y DE FUENTES

(LORETA/sLORETA/eLORETA/VARETA)

Máster de Formación Permanente en Cartografía cerebral
aplicada

DATOS BÁSICOS

Módulo

Tipología Obligatoria

Modalidad de impartición Virtual

Créditos 3 ECTS

Calendario Del 8 de octubre de 2026 al 18 de diciembre de 2026

Horario Jueves, de 19:00 a 21:30
Viernes, de 16:00 a 21:00

Idioma Español

Profesor responsable Jorge Bosch-Bayard

E-mail oldgandalf@gmail.com

Tutorías Contactar en plataforma Moodle

Otros profesores

BREVE DESCRIPCIÓN DE LA ASIGNATURA

La asignatura proporciona una formación avanzada en los fundamentos teóricos, matemáticos y neurofisiológicos del análisis de la conectividad cerebral mediante EEG. Se estudian los conceptos de dependencia estadística entre señales, incluyendo correlación, coherencia y sincronización, así como la diferencia entre interacciones de desfase nulo (zero-lag) y de desfase distinto de cero. El curso aborda la estimación de la conectividad tanto en el espacio de los electrodos como en el de las fuentes corticales, distinguiendo entre conectividad funcional y conectividad efectiva. Para ello se desarrolla el problema directo e inverso del EEG y se revisan las principales técnicas de localización de fuentes, desde los modelos de dipolo equivalente y las soluciones de norma mínima hasta la familia LORETA (LORETA, sLORETA, eLORETA), VARETA y los filtros espaciales adaptativos, atendiendo a sus supuestos, su resolución espacial y sus criterios de elección.

Se analizan asimismo de forma crítica los efectos del volumen conductor y de la mezcla espacial de las señales sobre las estimaciones de conectividad, junto con las principales estrategias de corrección mediante técnicas de unmixing y leakage correction y el uso de medidas robustas a la mezcla. El programa incorpora además los métodos avanzados de conectividad efectiva y el análisis de redes cerebrales desde la teoría de grafos, con sus métricas de segregación e integración, la identificación de nodos centrales y la evaluación estadística de las topologías obtenidas. El objetivo es que el alumnado adquiera los fundamentos necesarios para seleccionar, aplicar e interpretar con rigor los métodos modernos de análisis de redes cerebrales en investigación y práctica clínica.

RESULTADOS DE APRENDIZAJE

Al finalizar la asignatura, el alumnado deberá ser capaz de:

R06. Aplicar técnicas avanzadas de preprocesamiento y análisis de señales EEG para la obtención de métricas espectrales, topográficas y funcionales.

R07. Interpretar estudios de QEEG mediante bases normativas, análisis Z-score y técnicas de localización de fuentes cerebrales.

R12. Integrar la evaluación neurofisiológica, las neuroterapias y los criterios de seguridad en planes de tratamiento personalizados y multidisciplinarios.

CONTENIDOS

Unidad 1. Introducción a la conectividad cerebral

- 1.1. Organización del cerebro como red.
- 1.2. Concepto de conectividad cerebral y terminología.
- 1.3. Aplicaciones en neurociencia básica, clínica e interfaces cerebro-computadora.

Unidad 2. Fundamentos matemáticos del análisis de conectividad

- 2.1. Procesos estocásticos y dependencia estadística.
- 2.2. Correlación, covarianza y correlación cruzada.
- 2.3. Análisis espectral y transformada de Fourier.

Unidad 3. Medidas clásicas de conectividad funcional

- 3.1. Coherencia y coherencia parcial.
- 3.2. Sincronización de fase y medidas basadas en fase.
- 3.3. Medidas de amplitud y acoplamiento amplitud-fase.

Unidad 4. Interacciones temporales y causalidad

- 4.1. Conectividad zero-lag y non-zero lag.
- 4.2. Retardos temporales e interpretación fisiológica.
- 4.3. Conectividad funcional y conectividad efectiva.

Unidad 5. Conectividad en el espacio de los electrodos

- 5.1. Montajes de registro y referencia.
- 5.2. Matrices de conectividad y representación de redes.
- 5.3. Interpretación y limitaciones de la conectividad en sensores.

Unidad 6. El problema directo e inverso del EEG

- 6.1. Formulación del problema directo: modelos de cabeza y matriz de campo guía (lead field).

6.2. Naturaleza mal condicionada del problema inverso y no unicidad de la solución.

6.3. Regularización y restricciones anatómicas y fisiológicas.

Unidad 7. Técnicas de localización de fuentes

7.1. Modelos de dipolo equivalente y aproximaciones distribuidas.

7.2. Soluciones de norma mínima: MNE, wMNE y dSPM.

7.3. La familia LORETA: LORETA, sLORETA y eLORETA. Supuestos, resolución y sesgo de localización.

7.4. VARETA y aproximaciones bayesianas con varianza variable.

7.5. Beamformers (LCMV, DICS) y filtrado espacial adaptativo.

7.6. Criterios comparativos de elección: resolución espacial, error de localización y validación.

Unidad 8. Volumen conductor y mezcla espacial

8.1. Efectos del volumen conductor.

8.2. Spatial leakage y mezcla lineal de las fuentes.

8.3. Técnicas de unmixing y leakage correction.

8.4. Medidas robustas a la mezcla: imaginary coherency, PLI y orthogonalización de señales.

Unidad 9. Estimación de conectividad entre fuentes

9.1. Definición de regiones de interés y parcelaciones corticales.

9.2. Extracción de series temporales y agregación intra-ROI.

9.3. Conectividad en espacio de fuentes: ventajas, artefactos residuales y limitaciones interpretativas.

Unidad 10. Métodos avanzados de conectividad efectiva

10.1. Causalidad de Granger y modelos autorregresivos multivariantes.

10.2. DTF y PDC.

10.3. Modelos generativos de conectividad efectiva (DCM y afines).

Unidad 11. Análisis de redes cerebrales y teoría de grafos

- 11.1. Del grafo a la matriz de adyacencia: nodos, aristas y umbralización.
- 11.2. Métricas de segregación e integración: clustering, longitud de camino, eficiencia.
- 11.3. Centralidad, hubs y organización modular.
- 11.4. Topologías small-world y scale-free: alcance y críticas.
- 11.5. Redes nulas, significación estadística y reproducibilidad de las métricas de grafo.

Unidad 12. Aplicaciones de la conectividad cerebral

- 12.1. Desarrollo y envejecimiento cerebral.
- 12.2. Trastornos neurológicos y psiquiátricos.
- 12.3. Neuromodulación, neurofeedback y biomarcadores.

Unidad 13. Tendencias actuales y perspectivas futuras

- 13.1. Conectómica funcional y estructural.
- 13.2. Conectividad multimodal y aprendizaje automático.
- 13.3. Retos metodológicos y líneas actuales de investigación.

METODOLOGÍAS DOCENTES

Las metodologías docentes que se desarrollarán en las actividades formativas de esta asignatura serán:

- **Clase magistral:** sesiones expositivas orientadas a la presentación de los fundamentos teóricos, matemáticos y neurofisiológicos de la conectividad cerebral.
- **Aprendizaje basado en problemas:** resolución y discusión de problemas relacionados con la estimación e interpretación de medidas de conectividad.
- **Análisis de casos y publicaciones científicas:** revisión crítica de artículos y estudios representativos para valorar la aplicación, fortalezas y limitaciones de los diferentes métodos de conectividad.

- **Aprendizaje cooperativo:** Debates y discusión científica. Análisis de controversias metodológicas actuales, incluyendo el efecto del volumen conductor, la mezcla espacial de las señales y las estrategias de *unmixing* y *leakage correction*.
- **Estudio de casos:** interpretación crítica de resultados y revisión de aplicaciones en investigación y práctica clínica.

ACTIVIDADES FORMATIVAS

Las actividades formativas que se llevarán a cabo en esta asignatura serán:

- **Clases magistrales teóricas:** estudio de los fundamentos conceptuales, matemáticos y neurofisiológicos de la conectividad cerebral y de los principales métodos de análisis.
- **Seminarios prácticos**
 - **Prácticas con software especializado:** cálculo, visualización e interpretación de medidas de conectividad en registros EEG, tanto en el espacio de los electrodos como en el espacio de las fuentes.
 - Resolución de ejercicios y análisis de registros EEG mediante herramientas de estimación e interpretación de conectividad en el espacio de los electrodos y de las fuentes corticales.
- **Tutorías individuales y grupales:** orientación, resolución de dudas, asesoramiento metodológico y retroalimentación sobre las actividades desarrolladas.

SISTEMAS DE EVALUACIÓN

Convocatoria ordinaria

La evaluación de la asignatura se realizará mediante evaluación continua y una prueba final de conocimientos. La calificación se distribuirá de la siguiente forma:

- **Prueba objetiva tipo test (70%):** evaluación de los conocimientos teóricos y metodológicos adquiridos durante la asignatura.
- **Evaluación continua. Actividades prácticas y tareas (30%):** resolución de ejercicios, análisis e interpretación de resultados de conectividad, y otras actividades propuestas por el

profesorado a lo largo del curso. Estas actividades tendrán carácter acumulativo y permitirán valorar la adquisición progresiva de las competencias de la asignatura.

El profesorado podrá convocar al estudiante a una revisión o defensa de las actividades entregadas cuando lo considere necesario para garantizar su autoría.

Convocatoria extraordinaria

La evaluación seguirá el mismo sistema que en la convocatoria ordinaria, manteniendo la misma ponderación entre la prueba objetiva tipo test (70%) y las actividades prácticas y tareas (30%).

RECURSOS DE APRENDIZAJE Y APOYO TUTORIAL

- Nunez, P. L. & Srinivasan, R. (2006). *Electric Fields of the Brain: The Neurophysics of EEG* (2^a ed.). Oxford University Press.
- Fornito, A., Zalesky, A. & Bullmore, E. T. (2016). *Fundamentals of Brain Network Analysis*. Academic Press.
- Michel, C. M. & Brunet, D. (2019). EEG source imaging: a practical review of the analysis steps. *Frontiers in Neurology*, 10, 325. <https://doi.org/10.3389/fneur.2019.00325>
- Pascual-Marqui, R. D. (2002). Standardized low-resolution brain electromagnetic tomography (sLORETA): technical details. *Methods and Findings in Experimental and Clinical Pharmacology*, 24(Suppl D), 5–12. [y eLORETA: Pascual-Marqui, R. D. (2007), arXiv:0710.3341]
- Bosch-Bayard, J., Valdés-Sosa, P., Virués-Alba, T. et al. (2001). 3D statistical parametric mapping of EEG source spectra by means of variable resolution electromagnetic tomography (VARETA). *Clinical Electroencephalography*, 32(2), 47–61.
- Nolte, G., Bai, O., Wheaton, L., Mari, Z., Vorbach, S. & Hallett, M. (2004). Identifying true brain interaction from EEG data using the imaginary part of coherency. *Clinical Neurophysiology*, 115(10), 2292–2307.
- Stam, C. J., Nolte, G. & Daffertshofer, A. (2007). Phase lag index: assessment of functional connectivity from multichannel EEG and MEG with diminished bias from common sources. *Human Brain Mapping*, 28(11), 1178–1193.
- Colclough, G. L., Brookes, M. J., Smith, S. M. & Woolrich, M. W. (2015). A symmetric multivariate leakage correction for MEG connectomes. *NeuroImage*, 117, 439–448.

- Bastos, A. M. & Schoffelen, J.-M. (2016). A tutorial review of functional connectivity analysis methods and their interpretational pitfalls. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 9, 175.
- Rubinov, M. & Sporns, O. (2010). Complex network measures of brain connectivity: uses and interpretations. *NeuroImage*, 52(3), 1059–1069. Brain Connectivity Toolbox: <https://sites.google.com/site/bctnet/>
- Seth, A. K., Barrett, A. B. & Barnett, L. (2015). Granger causality analysis in neuroscience and neuroimaging. *Journal of Neuroscience*, 35(8), 3293–3297.

Software y tutoriales prácticos:

MNE-Python / MNE-Connectivity (<https://mne.tools/mne-connectivity/>),

FieldTrip (<https://www.fieldtriptoolbox.org/tutorial/connectivity/>),

Brainstorm (<https://neuroimage.usc.edu/brainstorm/>) y

LORETA-KEY (<https://www.uzh.ch/keyinst/loreta>).

BREVE CV DEL PROFESORADO

Jorge Bosch-Bayard. Doctor en Ciencias de la Salud. Neurocientífico especializado en electroencefalografía cuantitativa (qEEG), neuroimagen funcional y conectividad cerebral. Investigador con amplia experiencia internacional y autor de numerosas publicaciones científicas en análisis de EEG, modelado de fuentes y biomarcadores neurofisiológicos. Docente de posgrado en neurociencia, procesamiento de señales biomédicas y análisis avanzado del EEG. Actualmente Lecturer en Carl von Ossietszky Universität Oldenburg, Alemania.