

TÍTULO: Análisis espectroscópico - fotométrico de exoplanetas y sus estrellas anfitrionas			
AÑO: 2026	CUATRIMESTRE: 1°	N° DE CRÉDITOS: 3	VIGENCIA: 3 años
CARGA HORARIA: 80 horas de teoría y 40 horas de práctica			
CARRERA/S: Doctorado en Astronomía			

FUNDAMENTOS

Nuestro entendimiento de los sistemas planetarios extrasolares depende fuertemente del conocimiento que tengamos de sus estrellas huéspedes. Por ejemplo, la masa y el radio de un planeta transitante, los cuales son clave para determinar su estructura y composición, pueden determinarse sólo si conocemos la masa y el radio de la estrella anfitriona. A su vez, estas propiedades de la estrella dependen de parámetros fundamentales de la atmósfera estelar (temperatura efectiva, gravedad superficial y metalicidad) que pueden obtenerse de manera precisa a partir de espectros ópticos de alta calidad. Más aún, el análisis homogéneo y de alta precisión de la composición química de las estrellas con planetas aporta información crucial acerca de la frecuencia, arquitectura, composición, formación y evolución de los sistemas planetarios que albergan. Por su parte, el análisis fotométrico de alta precisión no sólo es fundamental para la detección y caracterización de exoplanetas mediante la técnica de tránsitos, sino también para el estudio de la actividad estelar. Esta actividad —que se manifiesta en variaciones de brillo debidas a manchas, fulguraciones o ciclos magnéticos— tiene un impacto directo en el entorno radiativo de los planetas, afectando la evolución de sus atmósferas y su potencial habitabilidad. Por todo esto, el estudio espectroscópico y fotométrico es fundamental para avanzar hacia una caracterización integral de los sistemas planetarios.

OBJETIVOS

El objetivo del curso es brindar una formación teórico-práctica centrada en dos ejes temáticos fundamentales —la espectroscopía y la fotometría— aplicados al análisis y caracterización observacional de planetas extrasolares y sus estrellas anfitrionas. Al finalizar el curso, se espera que las y los participantes:

- i) adquieran un conocimiento sólido del marco teórico y de los avances recientes en el estudio de la conexión química entre estrellas y planetas, así como en la técnica de tránsitos;
- ii) desarrollen habilidades en el uso de herramientas computacionales para la caracterización de exoplanetas y sus estrellas mediante el análisis de datos observacionales espectroscópicos y fotométricos de alta calidad.

PROGRAMA

Unidad I: La conexión estrella-planeta I: La correlación planeta-metalicidad

Introducción - Técnica de detección de exoplanetas: velocidad radial y tránsitos - Propiedades orbitales y físicas de los exoplanetas confirmados - Definición de metalicidad - Correlación planeta-metalicidad en estrellas de tipo solar - Origen de la correlación planeta-metalicidad e implicancias para los modelos de formación planetaria - Pruebas observacionales - Metalicidad de estrellas con planetas de baja masa - Metalicidad de estrellas T Tauri y con discos de escombros - Metalicidad de estrellas M - Metalicidad en estrellas evolucionadas - Metalicidad estelar y arquitectura de los sistemas planetarios - Metalicidad de estrellas con planetas transitantes - efecto de la masa estelar en la frecuencia de planetas gigantes

Unidad II: La conexión estrella-planeta II: abundancias químicas de otros elementos

además del hierro

Exceso de elementos alfa en estrellas con planetas de baja metalicidad - Litio en análogas solares con planetas - Composición química del Sol y su relación con la formación planetaria - Efectos de evolución química galáctica - Abundancias químicas de sistemas binarios con planetas. Estrellas gigantes ricas en litio. Estrellas binarias evolucionadas. Enanas blancas con anomalías químicas. Otras estrellas químicamente peculiares: el caso de las Lambda Boo y Am. Planetas alrededor de estrellas del disco grueso y el halo de la Vía Láctea - Relación entre la composición de planetas rocosos y las abundancias de las estrellas anfitrionas. Difusión atómica

Unidad III: Parámetros estelares a partir de espectroscopía de alta resolución I: parámetros fundamentales estelares y su rol en la caracterización de exoplanetas

Importancia de la medición de parámetros estelares precisos en la caracterización de exoplanetas - Comparación con métodos fotométricos - Impacto del análisis espectroscópico de precisión en la detección del "radius gap" - Estrellas ricas en metales y habitabilidad planetaria. Parámetros estelares a partir de espectroscopía de alta calidad I: Determinación de temperatura, gravedad y metalicidad a partir de equilibrio espectroscópico - Corrección por velocidad radial - Medición de anchos equivalentes - Uso de los códigos MOOG, q2, ARES, SPLOT - Pruebas de consistencia - Determinación de errores

Unidad IV: Parámetros estelares a partir de espectroscopía de alta resolución II: abundancias químicas

Determinación de abundancias químicas vía anchos equivalentes y síntesis espectral - Método de análisis diferencial - Programas: MOOG, q2, i-spec, FUNDPAR, ARES, splot, correcciones NLTE

Unidad V: Parámetros estelares a partir de espectroscopía de alta resolución III: masas, radios y edades

Determinación de masas, radios y edades a partir de isócronas - Determinación de edades a partir de abundancias químicas - Métodos independientes de los modelos estelares - Relaciones empíricas - Programas: PARAM, q2. Aplicación práctica de los diversos códigos a datos reales (espectros HARPS, GRACES, etc) para la determinación de parámetros estelares

Unidad VI: Tránsitos planetarios: fundamentos, detección y caracterización de exoplanetas

Definición de tránsito planetario. Determinación de propiedades físicas a partir de curvas de luz. Profundidad en planetas terrestres y gigantes. Probabilidad geométrica. Primer exoplaneta transitante. Planetas tipo Júpiter caliente. Espectroscopía para confirmar la naturaleza planetaria de candidatos. Composición Interna Planetaria. Primeros resultados del GrEP. PRÁCTICA 1: Estimación de parámetros planetarios a partir de tránsitos.

Unidad VII: Misiones y métodos fotométricos para la detección y caracterización de exoplanetas

Fotometría de campo amplio. Primeros relevamientos desde Tierra. El proyecto SuperWASP. Falsos positivos. Misiones Kepler, K2 y TESS. Variaciones en los Tiempos de Mínimo. Decaimiento Orbital. Introducción a los códigos BLS y TLS.

Unidad VIII: Tránsitos planetarios en estrellas frías y evolucionadas

Exoplanetas transitantes alrededor de estrellas de secuencia principal. Exoplanetas transitantes alrededor de estrellas evolucionadas. Tránsitos alrededor de estrellas M. Tránsitos alrededor de enanas blancas. Estrellas Enanas Ultra-Frías. Búsqueda de tránsitos planetarios alrededor de enanas ultra-frías. Proyectos SPECULOOS, SAINT-EX y ExTRA. Tránsitos de planetas en fotoevaporación o desintegración. Desierto subjoviano o neptuniano. PRÁCTICA 2: Aplicación del código TLS a datos fotométricos obtenidos a partir de misiones espaciales

Unidad IX: Actividad estelar y su impacto en la detección de exoplanetas

Actividad Estelar. Fulguraciones. Manchas Frías. Influencia de la actividad estelar en la detección de tránsitos planetarios. PRÁCTICA 3: Aplicación del código TLS a datos fotométricos obtenidos desde tierra

Unidad X: Caracterización atmosférica de exoplanetas

Espectroscopía de Transmisión. Primera detección de la atmósfera de un exoplaneta. El telescopio JWST. Habitabilidad planetaria y biomarcadores. Misión PLATO

PRÁCTICAS

Las actividades prácticas consisten de dos partes principales:

- i) Se utilizarán códigos para la determinación de parámetros estelares utilizando espectros de alta resolución obtenidos con instrumentos de última generación (ej., HARPS, HIRES, GRACES).
- ii) Se aplicarán distintos códigos a) para buscar y caracterizar planetas extrasolares transitantes; b) analizar la actividad estelar. Para ello se trabajará con curvas de luz de alta precisión de misiones espaciales tales como Kepler y TESS, y en datos fotométricos obtenidos en facilidades argentinas (ej CASLEO; EABA).

Estas actividades se desarrollarán entre las unidades 3 y 5, y posteriormente entre las unidades 7 y 9. Los estudiantes deberán entregar las guías correspondientes una vez finalizadas, las cuales serán corregidas y devueltas con retroalimentación hasta que se alcancen los resultados esperados. La aprobación de estas actividades será requisito para la regularización del curso.

BIBLIOGRAFÍA

- “The Exoplanet Handbook”, Michael Perryman (2ª ed., Cambridge University Press, 2018)
- “Transiting Exoplanets”, Carole A. Haswell (Cambridge University Press, 2010)
- Artículos varios, incluyendo:
 - Teske Johana, Annual Review of Astronomy and Astrophysics Volume 62, 2024
 - Adibekyan, Vardan 2019, Geosc, 9, 105A
 - Adibekyan, V., et al., 2012, A&A, 547, 36
 - Adibekyan, V., et al., 2015, A&A, 581, L2
 - Adibekyan, V. et al. 2021, Sci, 374, 330
 - Bedell, M., Meléndez, J., Bean, J., et al., 2014, AJ 795, 23
 - Dorn, C., Hinkel, N. R., & Venturini, J. 2017a, A&A, 597, A38
 - Fischer, D. A., & Valenti, J. 2005, ApJ, 622, 1102
 - Gonzalez, G. 1997, MNRAS, 285, 403
 - Jofré Emiliano, Tesis Doctoral, FAMAf, 2015/79:
 - Jofré, E. et al. 2021, AJ, 162, 291J
 - Jofré, E. et al. 2020, A&A 634, 29

Jofré, E. et al. 2015b, A&A 584, 3
 Jofré, E. et al. 2015a, A&A 574, 50
 Jofré, E., Saffe C., & Petrucci 2010a, BAAA, 53, 273
 Jofré, E. & Saffe, C. 2010b, BAAA, 53, 277
 Meléndez, J., Asplund, M., Gustafsson, B., & Yong, D. 2009, ApJ, 704, L66
 Meléndez, J., Bergemann, M., Cohen, J. G., et al. 2012, A&A, 543, A29
 Meléndez, J., Bedell, M., Bean, J. L., et al. 2017, A&A, 597, A34
 Petrucci, Romina, Tesis doctoral, FAMAf, 2015/80
 Petrucci R., Jofré E., Schwartz M. et al. 2013, ApJL 779, 23P
 Petrucci, R., Jofré, E., Melita, M. et al. 2015, MNRAS, 446, 1389
 Petrucci R., Jofré E. et al. 2018, MNRAS, 473, 5126
 Ramírez, I. et al. 2019, MNRAS, 490, 2448,
 Ramírez, I., Meléndez, J., Cornejo, D. et al. 2011, ApJ, 740, 76
 Ramírez, I., et al. 2013, ApJ, 764, 78
 Ramírez, I., Khanal, S.; Aleo, P.; et al. 2015, ApJ, 808, 13
 Ramírez, I., Melendez, J., & Asplund, M. 2009, A&A, 508, L17
 Saffe, C., Flores, M., Buccino, A., 2015, A&A 582, A17
 Saffe, C et al., 2016, A&A 588, 81
 Saffe, C., Jofré, E., Martioli, E. et al. 2017, A&A 604, 5
 Saffe et al. 2018, A&A, 620A, 54
 Saffe, C., Jofré, E. et al. 2019, A&A 625, 39
 Santos, N. C., Israelian, G., & Mayor, M. 2004, A&A, 415, 1153
 Santos, N. C.; Adibekyan, V. et al. 2015, A&A, 580, 3

MODALIDAD DE EVALUACIÓN

-Cursado: asistencia del 70% de las clases teóricas y prácticas + Aprobación de trabajos prácticos
 -Final: Presentación oral de tema específico frente a tribunal designado + entrega de un trabajo práctico final.

REQUERIMIENTOS PARA EL CURSADO

Conocimientos básicos de astrofísica estelar y de atmósferas estelares - Conocimiento general de astronomía observacional, incluyendo nociones fundamentales de espectroscopía, fotometría y de instrumental astronómico en general.

TÍTULO: Cúmulos Globulares: Laboratorios Cósmicos de la Evolución Estelar			
AÑO: 2026	CUATRIMESTRE: 1°	N° DE CRÉDITOS: 3	VIGENCIA: 3 años
CARGA HORARIA: 60 horas de teoría			
CARRERA/S: Doctorado en Astronomía			

FUNDAMENTOS

Los cúmulos globulares son sistemas estelares vastos y densos que pueden contener hasta millones de estrellas, y constituyen pilares fundamentales para comprender la historia y evolución del Universo. Son objetos intrínsecamente brillantes, observables a grandes distancias, y entre los más antiguos conocidos, lo que permite utilizarlos para estimar la edad del Universo y estudiar las primeras etapas de la formación galáctica.

Estos sistemas están formados por estrellas situadas prácticamente a la misma distancia y, en muchos casos, con edades y composiciones químicas similares. Por ello, los cúmulos globulares representan los mejores ejemplos de poblaciones estelares simples, convirtiéndose en laboratorios naturales para el estudio de la evolución estelar.

En las últimas décadas, sin embargo, se han descubierto múltiples peculiaridades que desafían la visión clásica de los cúmulos globulares como sistemas simples. Su dinámica interna revela procesos complejos como la segregación por masa, la presencia de agujeros negros y la evaporación estelar; además, muestran notables variaciones químicas entre estrellas y albergan una rica variedad de objetos exóticos (e.g., blue stragglers, variables cataclísmicas y púlsares de milisegundo).

El presente curso se fundamenta en el estudio integral de las propiedades físicas, químicas y dinámicas de los cúmulos globulares, combinando observaciones fotométricas y espectroscópicas con el análisis y la modelización teórica.

OBJETIVOS

Al finalizar el curso, se espera que los estudiantes sean capaces de:

- Comprender el rol de los cúmulos globulares como laboratorios naturales de la astrofísica estelar y la evolución estelar.
- Analizar su contribución al conocimiento de la formación temprana de la Vía Láctea y otras galaxias.
- Estudiar procesos dinámicos en los cúmulos globulares.
- Investigar la abundancia química y la existencia de poblaciones múltiples.
- Evaluar la relevancia cosmológica de estos sistemas en el contexto de la evolución del Universo.

PROGRAMA

Unidad I: Propiedades de los cúmulos globulares.

Diagramas color-magnitud. Colores integrados. Espectroscopía de estrellas individuales e integrada. Determinación de edades, abundancias química y distancias. Masas. Frecuencia de estrellas binarias. Remanentes estelares en los cúmulos globulares. Propiedades dinámicas-estructurales. Principales escenarios de formación.

Unidad II: Cúmulos globulares de la Vía Láctea.

Los cúmulos globulares del halo y del disco galáctico. Evolución y destrucción. Formación del

halo galáctico. Arqueología galáctica. Origen del sistema de cúmulos globulares.

Unidad III: Cúmulos globulares extragalácticos.

Los cúmulos globulares de las Nubes de Magallanes y de M31. Masas de los cúmulos globulares. Cúmulos globulares en otras galaxias irregulares. Distribución espacial. Propiedades integradas.

Unidad IV: Poblaciones estelares múltiples en los cúmulos globulares.

Aspectos observacionales. Diferentes estados evolutivos en el diagrama color-magnitud. Espectros integrados como combinación de poblaciones estelares simples. Variaciones de abundancias. Teorías sobre el origen de las poblaciones múltiples.

PRÁCTICAS

Los estudiantes deberán preparar una presentación oral basada en artículos científicos vinculados a un tema determinado de la materia.

BIBLIOGRAFÍA

Principales libros y reviews que se utilizarán:

- Archinal, B.A., Hynes, S.J., 2003, "Star Clusters", Willmann-Bell Pub.
 - Ashman, K., Zepf, S., 2008, "Globular Cluster Systems", Cambridge University Press.
 - Barbuy, B. et al., 2018, Annu. Rev. Astron. Astrophys. 56, 6.
 - Bastian, N., Lardo, C., 2018, Annu. Rev. Astron. Astrophys. 56, 83
 - Bland-Hawthorn, J., Gerhard, O., 2016, Annu. Rev. Astron. Astrophys. 54, 529.
 - de Boer, K., Seggewiss, W., 2008, "Stars and Stellar Evolution", EDS Science.
 - D'Onghia, E., Fox, A., 2016, Annu. Rev. Astron. Astrophys. 54, 363.
 - Gilmore, G., 2013, "Galactic Structure and Stellar Populations" (Editor), Springer Dordrecht Heidelberg-New York-London.
 - Gratton, R., et al., 2004, Annu. Rev. Astron. Astrophys. 42, 385.
 - Gratton, R., et al., 2012, Astron Astrophys Rev 20, 50.
 - Gratton, R., et al., 2019, Astron Astrophys Rev 27, 8.
 - Helmi, A., 2020, Annu. Rev. Astron. Astrophys. 58, 205.
 - Krumholz, M., et al., 2019, Annu. Rev. Astron. Astrophys. 57, 227.
 - Portegies, S., et al., 2010, Annu. Rev. Astron. Astrophys. 48, 431.
 - Renzini, A., Greggio, L., 2012, "Stellar Populations: A Guide from Low to High Redshift", John Wiley & Sons, Pub.
 - Sakari, C., 2019, "The Globular Star Clusters of the Andromeda Galaxy" Morgan & Claypool Publishers.
 - Salaris, M., Cassisi, S., 2005, "Evolution of Stars and Stellar Populations", John Wiley & Sons, Pub.
- Y otros papers recientes sobre los temas propuestos.

MODALIDAD DE EVALUACIÓN

Regularidad del curso: asistencia mayor al 80% y presentación y aprobación de un seminario con la exposición de la práctica.

Aprobación del curso: examen final oral integrador

REQUERIMIENTOS PARA EL CURSADO

Conocimientos básicos de: astrofísica general, astronomía galáctica y técnicas de observación astronómica (fotometría y espectroscopía).

TÍTULO: Elementos de espectroscopía astronómica con red de difracción			
AÑO: 2026	CUATRIMESTRE: 1°	N° DE CRÉDITOS: 3	VIGENCIA: 3 años
CARGA HORARIA: 48 horas de teoría y 24 horas de práctica			
CARRERA/S: Doctorado en Astronomía			

FUNDAMENTOS

El curso está dirigido a profundizar en el conocimiento de los aspectos teóricos, instrumentales y prácticos relacionados con la técnica de espectroscopía óptica con red de difracción plana y detectores CCD.

El desarrollo del curso está fuertemente vinculado a los aspectos instrumentales, teóricos y de cálculo, necesarios para desempeñarse en la temática de la espectroscopía astronómica de mediana y baja resolución.

Este curso es de gran importancia para aquellos alumnos que pretendan utilizar la técnica de la espectroscopía en sus investigaciones.

OBJETIVOS

Al finalizar la materia los estudiantes estarán en condiciones de: comprender los aspectos teóricos relacionados a la obtención de un espectrograma.

El objetivo es que el alumno adquiera herramientas que le permitan planificar, optimizar y tomar espectros de ranura larga con CCD. Reducir, clasificar, medir y familiarizarse con los espectrogramas.

Se espera, además, que el alumno al finalizar el curso cuente con un manejo aceptable de IRAF.

PROGRAMA

Unidad I: Red de difracción

Condiciones de interferencia, principios de la red de difracción, ecuación de la red, órdenes de difracción, superposición de órdenes, patrón de difracción, máximos primarios y secundarios, criterio de Rayleigh, dispersión, poder resolvente, redes con blaze, ecuación general de la red, distribución de energía, rango espectral libre, problemas de las redes, enfoque y corrección de aberraciones, apodising, curvatura de las líneas espectrales, los fantasmas de las redes, eficiencia de las redes, redes holográficas y rayadas.

Unidad II: Espectrógrafos con red de difracción

Diseño óptico, algunos tipos de espectrógrafos, características fundamentales, amplificación, dispersión, distribución de la energía en el plano focal, poder resolvente práctico, luminosidad, eficiencia, criterios de comparación, ranura, colimador y cámara, longitud focal y $\#/f$, enfoque del espectrógrafo, combinación espectrógrafo-telescopio. Características ópticas y constructivas de materiales, componentes y aparatos espectrales que utilizan los espectrógrafos de uso astronómico, fuentes de error mecánicas y ambientales.

Unidad III: Influencia de los factores externos al espectrógrafo que afectan la obtención de datos

Máscara de Hardmann, guiado del telescopio, aluminizado de la óptica del telescopio, flexiones del material, nubes, seeing, refracción diferencial, rayos cósmicos, brillo de cielo, luna, contaminación de estrellas cercanas, perfil de la imagen estelar, coeficientes de

extinción atmosféricos, extinción interestelar.

Unidad IV: Calidad de los datos

Relación señal ruido, factores de ruido a considerar, ecuación general, técnicas para optimizar la S/N, degradación de la S/N en el proceso de reducción, medición de la S/N.

Unidad V: Aspecto prácticos del detector CCD

Ajuste de la ganancia, cuantificación del ruido de lectura, eficiencia cuántica, linealidad-saturación, rango dinámico, overscan, bias, pixeles no lineales, corriente de oscuridad, aplanado del campo, flecos.

Unidad VI: Planificar observación

Elección de la red, rango espectral, tamaño y ángulo de posición de la ranura, tiempos de integración, estimación de overheads, selección de la lámpara de arco, tipo y cantidad de imágenes de calibración, tipo y número de estrellas estándares.

Unidad VII: Reducción de espectrogramas

Aspectos teóricos del proceso de reducción, manejo básico del paquete IRAF, reducción del espectro bidimensional, extracción del espectro (nebular y estelar), calibración en longitud de onda y flujo, desenrojecimiento y normalización.

Unidad VIII: Medición de espectros

Topología de los espectros, diferentes perfiles de líneas, ajuste de un perfil gaussiano, mecanismos de ensanchamiento de líneas, desdoblamiento de líneas de emisión (velocidad de expansión), espectros compuestos (sistemas binarios), expresiones para determinar la incerteza en la longitud de onda, flujo y ancho equivalente de líneas espectrales, medición del continuo estelar (estima de temperatura). Identificación de iones, criterios para evaluar la calidad del espectro, identificación de líneas interestelares (estima de distancia), primera inspección del espectro. Identificar espectros de estrellas (estimación del tipo espectral), nebulosas (con diferentes clases de excitación), objetos extragalácticos y peculiaridades. Cocientes de líneas, medición de extinción interestelar, determinación de velocidad radial. Determinación de parámetros físicos de regiones HII (temperatura, densidad y abundancias).

PRÁCTICAS

Se trabajaran con espectros usando el software IRAF. Serán cinco prácticos. Los prácticos se desarrollaran en la sala de cómputos del OAC. Los prácticos estarán a mi cargo. Serán con presentación de informes. Estos informes serán evaluados.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

-TÉCNICA Y PRÁCTICA DE ESPECTROSCOPIA

A. N. Zaidel, G. V. Ostrovskaya & YU. I. Ostrovski (MIR, 1979)

-OPTICAL ASTRONOMICAL SPECTROSCOPY

C R Kitchin (Taylor & Francis, 1995)

-DIFFRACTION GRATING HANDBOOK
Erwin Loewen (Newport Corporation, 2005)

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

-SPECTROGRAPH DESING FUNDAMENTALS
Jhon James (Cambridge, 2007)

-INTERPRETING ASTRONOMICAL SPECTRA
D. Emerson (John Wiley & Sons Ltd, 1997)

- ASTRONOMICAL IMAGE AND DATA ANALYSIS
Jean-Luc Starck and Fionn Murtagh (Springer, 2006)

-MANUAL PRÁCTICO DE ASTRONOMÍA CON CCD
D. Galadí-Enríquez, I. Ribas (Omega, 1998)

-ÓPTICA
Hecht E. & Zajac A. (Addison-Wesley Iberoamericana, 1986)

-SPECTROPHYSICS. PRINCIPLES AND APLICATIONS
A.Thorne, U. Litzen, S. Johansson (Springer, 1999).

-Artículos y publicaciones en revistas

MODALIDAD DE EVALUACIÓN

Examen final integrador, oral.

Aprobar los cinco trabajos prácticos (con presentación de informe), pudiendo recuperar dos.

REQUERIMIENTOS PARA EL CURSADO

Es fundamental tener conocimientos de óptica, en particular interferencia y difracción. Esto permite comprender cómo se forma el espectro en el plano focal del espectrógrafo. Por otra parte, para la interpretación de los espectros astronómicos se requiere que el alumno cuente con conocimientos de atmósferas estelares y los mecanismos por los cuales emiten las regiones HII.

TÍTULO: Interpretabilidad y Explicabilidad en Inteligencia Artificial			
AÑO: 2026	CUATRIMESTRE: 1°	N° DE CRÉDITOS: 3	VIGENCIA: 3 años
CARGA HORARIA: 60 horas de teoría y 60 horas de práctica			
CARRERA/S: Doctorado en Astronomía, Doctorado en Física, Doctorado en Ciencias de la Computación			

FUNDAMENTOS

La interpretabilidad y explicabilidad en inteligencia artificial (XIA) han emergido como campos críticos debido a la creciente adopción de sistemas de aprendizaje automático en dominios de alto riesgo como healthcare, finanzas y justicia. Este programa está diseñado para proporcionar una comprensión profunda de los métodos y procesos que permiten a los usuarios humanos comprender y confiar en los resultados generados por algoritmos de IA, distinguiendo entre interpretabilidad inherente y explicabilidad post-hoc. El curso abarca desde fundamentos conceptuales hasta desarrollos vanguardistas como interpretabilidad mecánica y análisis de circuitos neuronales, proporcionando herramientas universalmente aplicables que permiten elucidar "por qué" un modelo toma determinadas decisiones con los datos proporcionados, preparando así a los estudiantes para abordar los desafíos emergentes del campo en cualquier área de investigación.

OBJETIVOS

Que el alumno comprenda los principios fundamentales que distinguen interpretabilidad y explicabilidad en sistemas de IA, desarrolle competencias en la aplicación de métodos tradicionales y avanzados de XAI, y adquiera la capacidad de evaluar críticamente diferentes enfoques según el contexto y los stakeholders. Se busca proporcionar herramientas teórico-prácticas para el diseño de sistemas interpretables, el análisis de circuitos neuronales en modelos grandes, y la implementación de frameworks de evaluación robustos. Además, se pretende que el alumno desarrolle criterio para integrar consideraciones de explicabilidad con aspectos de robustez, fairness y transparencia algorítmica.

PROGRAMA

Unidad I: Fundamentos y Factores Humanos

Introducción a la inteligencia artificial explicable: definiciones, objetivos y taxonomías. Contextualización histórica desde modelos interpretables hasta deep learning. Test de Turing para explicaciones. Factores humanos en explicabilidad: necesidades de diferentes usuarios finales (médicos, ingenieros ML, reguladores). Estudios empíricos sobre comprensión humana de explicaciones. Sesgos cognitivos y limitaciones en la interpretación de explicaciones. Marcos conceptuales para diseño centrado en humanos. Diferencias entre interpretabilidad, explicabilidad y transparencia.

Unidad II: Métodos de Interpretabilidad y Explicabilidad

Modelos inherentemente interpretables: árboles de decisión, regresión lineal, reglas bayesianas. Ventajas y limitaciones de la interpretabilidad by-design. Explicaciones post-hoc: atribuciones de características (LIME, SHAP, Integrated Gradients). Fundamentos matemáticos de métodos de atribución. Pitfalls y desafíos: robustez, estabilidad y sanity checks. Explicaciones contrafactuales y recourse algorítmico. Generación de contrafactuales factibles y válidos. Evaluación crítica de métodos de atribución tradicionales.

Unidad III: Técnicas Avanzadas y Evaluación

Explicaciones basadas en atención y conceptos: análisis de attention maps, concept activation vectors (CAVs). Atribución de datos e influencia: influence functions, data shapley. Explicaciones interactivas y interfaces de usuario. Teoría de la explicabilidad: axiomas de Shapley, propiedades deseables. Interpretación de modelos generativos: GANs, VAEs, diffusion models. Conexiones con robustez, privacidad, fairness y machine unlearning. Frameworks de evaluación integral y métricas de calidad.

Unidad IV: Interpretabilidad de Modelos Grandes

Interpretabilidad mecanística: reverse engineering de redes neuronales. Análisis de transformers compilados y circuitos computacionales. Comprensión y razonamiento en Large Language Models: emergent abilities, in-context learning, chain-of-thought reasoning. Interpretación de otros modelos grandes: vision transformers, modelos multimodales. Técnicas de análisis causal en arquitecturas transformer. Probing tasks y representational analysis. Scaling laws para interpretabilidad.

Unidad V: Fronteras Emergentes de XAI

Automated Circuit Discovery (ACDC): identificación automática de circuitos neurales. Sparse Autoencoders (SAEs): descomposición de neuronas polisemánticas. Path patching y activation patching para rastreo de información. Linear Representation Hypothesis y direcciones interpretables. XAI multimodal: modelos vision-language, cross-modal attention analysis. Framework MAIA para interpretabilidad automatizada. Explicación de alucinaciones en modelos multimodales. F-Fidelity y M4 benchmark para evaluación avanzada. Tendencias futuras y desafíos abiertos.

PRÁCTICAS

El componente práctico del curso se estructura mediante trabajos progresivos que integran la aplicación de técnicas de XAI con la línea de investigación específica de cada estudiante. Los trabajos incluyen análisis de resultados de cualquiera de las técnicas y herramientas presentadas en el curso y desarrollo de un informe con formato de paper académico. Complementariamente, los estudiantes participarán en seminarios grupales temáticos donde presentan y discuten críticamente desarrollos avanzados del campo.

BIBLIOGRAFÍA

- Adebayo et. al., 2018, Sanity Checks for Saliency Maps
- Agarwal et. al., 2023, OpenXAI: Towards a Transparent Evaluation of Model Explanations
- Bau and Zhou et. al., 2017, Network Dissection: Quantifying Interpretability of Deep Visual Representations
- Begley et. al., 2020, Explainability for Fair Machine Learning
- Bricken et al., 2023, Towards Monosemanticity: Decomposing Language Models With Dictionary Learning
- Caruana et. al., 2015, Intelligible Models for Healthcare
- Cho et. al., 2022, DALL-EVAL: Probing the Reasoning Skills and Social Biases of Text-to-Image Generative Models
- Conmy et al., 2023, Towards Automated Circuit Discovery for Mechanistic Interpretability
- Covert et. al., 2021, Explaining by Removing: A Unified Framework for Model Explanation
- Dombrowski et. al., 2019, Explanations can be manipulated and geometry is to blame
- Geva et al., 2023, Dissecting Recall of Factual Associations in Auto-Regressive Language Models

- Ghai et. al., 2020, Explainable Active Learning (XAL): Toward AI Explanations as Interfaces for Machine Teachers
- Ghorbani et. al., 2019, What is your data worth? Equitable Valuation of Data
- Han et. al., 2022, Which Explanation Should I Choose? A Function Approximation Perspective to Characterizing Post hoc Explanations
- Hong et. al., 2020, Human Factors in Model Interpretability: Industry Practices, Challenges
- Karimi et. al., 2020, Algorithmic Recourse: From Counterfactual Explanations to Interventions
- Kaur et. al., 2020, Interpreting Interpretability: Understanding Data Scientists's Use of Interpretability Tools for Machine Learning
- Kim et. al., 2018, Interpretability Beyond Feature Attribution: Quantitative Testing with Concept Activation Vectors
- Koh et. al., 2017, Understanding Black Box Predictions via Influence Functions
- Krishna et. al., 2023, Towards Bridging the Gaps between the Right to Explanation and the Right to be Forgotten
- Lage et. al., 2019, Human Evaluation of Models Built for Interpretability
- Lakkaraju et. al., 2016, Interpretable Decision Sets
- Lampinen et. al., 2022, Can language models learn from explanations in context?
- Letham and Rudin, 2015, Interpretable Classifiers Using Rules and Bayesian Analysis
- Li et. al., 2017, Deep Learning for Case Based Reasoning Through Prototypes
- Lindner et. al., 2023, Tracr: Compiled Transformers as a Laboratory for Interpretability
- Lundberg and Lee, 2017, A Unified Approach to Interpreting Models
- McGrath et. al., 2022, Acquisition of Chess Knowledge in Alpha Zero
- Mullenbach et. al., 2018, Explainable Prediction of Medical Codes from Clinical Text Jain and Wallace, 2019, Attention is not Explanation
- Nanda et. al., 2023, Progress Measures for Grokking via Mechanistic Interpretability
- Olah, 2020, An Introduction to Circuits
- Olah, 2022, Mechanistic Interpretability, Variables, and the Importance of Interpretable Bases
- Pawelczyk et. al., 2022, Probabilistically Robust Recourse: Navigating the Trade-offs between Costs and Robustness in Algorithmic Recourse
- Pawelczyk et. al., 2023, On the Privacy Risks of Algorithmic Recourse
- Poursabzi-Sangdeh et. al., 2021, Manipulating and Measuring Model Interpretability
- Rajani et. al., 2019, Explain Yourself! Leveraging Language Models for Common Sense Reasoning
- Ribeiro et. al., 2016, Why should I trust you? Explaining the Predictions of Any Classifier
- Shah et. al., 2021, Do Input Gradients Highlight Discriminative Features?
- Shen et. al., 2020, Interpreting the Latent Space of GANs for Semantic Face Editing
- Harkonen et. al., 2020, GANSpace: Discovering Interpretable GAN Controls
- Slack and Hilgard et. al., 2020, Fooling LIME and SHAP
- Slack et. al., 2022, TalkToModel: Explaining Machine Learning Models with Interactive Natural Language Conversations
- Smilkov et. al., 2017, Smoothgrad: Removing noise by adding noise
- Sundararajan et. al., 2017, Axiomatic Attribution for Deep Networks
- Tang et. al., 2022, What the DAAM: Interpreting Stable Diffusion Using Cross Attention
- Upadhyay et. al., 2021, Towards Robust and Reliable Algorithmic Recourse
- Wachter et. al., 2018, Counterfactual Explanations Without Opening the Black Box
- Wei et. al., 2022, Chain of Thought Prompting Elicits Reasoning in Large Language Models
- Yin et. al., 2022, Interpreting Language Models with Contrastive Explanations

MODALIDAD DE EVALUACIÓN

Examen oral en el cual se expone el tema investigado
--

REQUERIMIENTOS PARA EL CURSADO

Conocimientos sólidos de machine learning, álgebra lineal, cálculo multivariable y programación científica (Python). Familiaridad con frameworks de deep learning (PyTorch/TensorFlow). Experiencia previa con redes neuronales y modelos de lenguaje recomendada pero no indispensable.
--

TÍTULO: Introducción al análisis de series temporales			
AÑO: 2026	CUATRIMESTRE: 1°	N° DE CRÉDITOS: ACM 3 F2	VIGENCIA: 3 años
CARGA HORARIA: 50 horas de teoría y 25 horas de práctica			
CARRERA/S: Doctorado en Matemática, Doctorado en Astronomía, Doctorado en Física, Doctorado en Ciencias de la Computación			

FUNDAMENTOS

Las series de tiempo constituyen una herramienta estadística fundamental para analizar y predecir patrones en datos que evolucionan a lo largo del tiempo. El análisis de series temporales abarca un conjunto de métodos diseñados para examinar estadísticas descriptivas significativas, así como otras características inherentes a los datos, como tendencias, ciclos y variabilidad. Por su parte, la predicción de series temporales implica la aplicación de modelos matemáticos que estiman valores futuros a partir de observaciones históricas previas. En esencia, estos datos se modelan típicamente como procesos estocásticos, que capturan tanto componentes determinísticos como aleatorios.

El análisis espectral y el de series temporales representan técnicas complementarias para el estudio de datos secuenciales en el tiempo. Mientras que el análisis de series temporales se centra en las relaciones temporales entre las observaciones —permitiendo identificar patrones secuenciales, tendencias lineales o no lineales, y variaciones estacionales—, el análisis espectral realiza una transformación de los datos desde el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Esta transformación desvela estructuras periódicas ocultas, al descomponer la serie en componentes cíclicos, como ondas sinusoidales y ciclos repetitivos, lo que facilita la detección de frecuencias dominantes.

En este curso introductorio, nos proponemos fomentar una estructura de pensamiento rigurosa que consolide hábitos de abstracción y generalización en el manejo de datos temporales. De este modo, los participantes aprenderán a diferenciar estos datos de observaciones generadas por variables aleatorias independientes, promoviendo un enfoque analítico que integre tanto la intuición estadística como herramientas computacionales prácticas para su aplicación en contextos reales.

OBJETIVOS

Nuestro propósito en este curso es estudiar técnicas para extraer inferencias de series de tiempo. Para ello, es necesario establecer un modelo probabilístico hipotético para representar los datos. Una vez elegida una familia adecuada de modelos, entonces es posible estimar parámetros, verificar la bondad de ajuste a los datos y, posiblemente, utilizar el modelo ajustado para mejorar nuestra comprensión del mecanismo que genera la serie. Una vez desarrollado un modelo satisfactorio, este puede utilizarse de diversas maneras, dependiendo del campo de aplicación particular.

PROGRAMA

Unidad I: Introducción a las series de tiempo

Ejemplos de series de tiempo. Objetivos del análisis de series de tiempo. Algunos modelos simples de series de tiempo: modelos de media cero, modelos con tendencia y estacionalidad. Un enfoque general para el modelado de series de tiempo: modelos estacionarios y la función de autocorrelación. Estimación y eliminación de componentes de tendencia y estacionales. Estimación y eliminación de tendencia en ausencia de estacionalidad. Estimación y eliminación de tendencia y estacionalidad. Pruebas de hipótesis para la secuencia de ruido

estimada.

Unidad II: Modelos para series de tiempo estacionarias

Propiedades básicas. Procesos lineales. Introducción a los procesos ARMA(p,q). Propiedades de la media muestral y de la función de autocorrelación. Predicción de series temporales estacionarias. La ACF y la PACF de un proceso ARMA(p,q).

Unidad III: Análisis Espectral

Densidades espectrales. El periodograma. la densidad espectral de un proceso ARMA.

Unidad IV: Modelado y Predicción con procesos ARMA

Estimación preliminar. Estimación de máxima verosimilitud. Chequeo de diagnóstico. Predicción. Selección de orden.

Unidad V: Modelos de series no estacionarias

Modelos ARIMA para series no estacionarias. Raíces unitarias. Predicción de modelos ARIMA. Modelos ARIMA estacionales. Detección e interpretación de un modelo estacional ARIMA explorando simultáneamente la ACF y la PACF. Crear e interpretar gráficos de diagnóstico.

Unidad VI: Suavizado de series

Identificar e interpretar descomposiciones aditivas y multiplicativas. Suavizado Lowess. Suavizado por medias móviles. Suavizado exponencial Brown, Holt, Winters.

Unidad VII: Modelos de correlación de largo alcance

Definir modelos de correlación de largo alcance. Identificar e interpretar modelos simples de diferenciación fraccionaria. Reconocer cuándo tomar diferencias de primer orden frente a diferencias fraccionarias. Identificar e interpretar modelos ARFIMA. Aplicar diferentes modelos dentro de dos intervalos de una serie de tiempo

Unidad VIII: Problemas prácticos

Predicción, clasificación y segmentación de series. Comparación entre SARIMAX y PROPHET. Autoencoding para clasificación de segmentos. Detección de eventos raros.

PRÁCTICAS

Las actividades prácticas son computacionales y se realizarán en el laboratorio con supervisión del docente.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) Introduction to Time Series and Forecasting Peter J. Brockwell & Richard A. Davis 2016 (3rd ed.)
- 2) Forecasting: Principles and Practice, Rob J. Hyndman & George Athanasopoulos, 2018 (3rd ed.)
- 3) Introduction to Time Series Forecasting with Python: How to Prepare Data and Develop Models to Predict the Future. Jason Brownlee
- 4) Time Series Analysis: Forecasting and Control George E. P. Box, Gwilym M. Jenkins, Gregory C. Reinsel & Greta M. Ljung 2015 (5th ed.)

MODALIDAD DE EVALUACIÓN

Para regularizar la materia: entrega de ejercicios del práctico.
--

El examen final es un proyecto integrador que se defenderá en forma de coloquio.
--

REQUERIMIENTOS PARA EL CURSADO

Conocimientos de estadística, modelado, simulación y ciencia de datos.
--

TÍTULO: Los voids cósmicos			
AÑO: 2026	CUATRIMESTRE: 1°	N° DE CRÉDITOS: 3	VIGENCIA: 3 años
CARGA HORARIA: 60 horas de teoría y 60 horas de práctica			
CARRERA/S: Doctorado en Astronomía, Doctorado en Física			

FUNDAMENTOS

Los motivos que justifican el dictado del curso están basados en la gran relevancia que han adquirido los voids cósmicos en el estudio del Universo a gran escala, debido a que son candidatos a poner en jaque o confirmar la validez del modelo cosmológico estándar.

Las observaciones del void local arrojan un número de galaxias menor al esperado de acuerdo al modelo cosmológico más aceptado. Esto posiciona al estudio y búsqueda de galaxias en la zona de avoidance como protagonista a la hora de poner a prueba el modelo de Universo, que actualmente es la base de la gran mayoría de los estudios de astronomía extragaláctica y cosmología.

Desde el punto de vista de la dinámica, el estudio de los campos de velocidades en el entorno a los voids es conveniente para describir de manera simple la formación y evolución de la estructura a gran escala del Universo. Además, el origen de la velocidad peculiar del grupo local no está completamente comprendido. En este contexto, el estudio del efecto de la expansión y movimientos del void local en las velocidades peculiares de las galaxias vecinas podría aportar al conocimiento de la dinámica del grupo local y de nuestra galaxia.

OBJETIVOS

Los objetivos del curso consisten en que el alumno adquiera un visión completa y unificada de la distribución y dinámica de las mayores estructuras que conforman el Universo observado, tales como cúmulos, voids, filamentos y paredes. En particular, se pretende que el alumno sea capaz de comprender la evolución de las grandes estructuras del Universo local en términos del void local, en una representación global que comprenda tanto la acreción de galaxias hacia los cúmulos como la expansión del void local.

Por otro lado, los voids cósmicos constituyen verdaderos laboratorios donde se pone de manifiesto la evolución de las galaxias en un ambiente prístino. Se espera que el alumno adquiera herramientas que le permitan resolver problemas relacionados con el efecto del void local en la formación y evolución de las galaxias, como así también en sus propiedades observacionales.

PROGRAMA

Unidad I: Voids cósmicos

Definición. Propiedades generales. Perfiles de densidad: perfil interno y de las paredes que los rodean. Función de distribución espacial, correlaciones. Volumen ocupado por voids y distribución de tamaños. Métodos y algoritmos de búsqueda e identificación. Comparaciones, ventajas e inconvenientes de los más utilizados.

Unidad II: Dinámica de voids

Dinámica interna. Expansión y colapso de voids cósmicos: procesos "void_in_void" y "void-in-cloud". Bimodalidad en la evolución de voids. Relación de la dinámica de los voids con las estructuras circundantes. Dinámica global: movimiento del void como un todo.

Velocidad de los voids en un contexto de estructuras a gran escala vecinas como grupos y cúmulos de galaxias. Interpretación de los movimiento de las galaxias en términos de las velocidades de los grupos y cúmulos, conjuntamente con la expansión y desplazamientos de

voids.

Unidad III: Los voids como laboratorios cosmológicos.

Modelos cosmológicos. Los voids en espacio real y de redshift. Fuentes de distorsiones en espacio de redshift. La función de correlación cruzada void-galaxia. El efecto Alcock-Paczynski. Tests cosmológicos basados en voids cósmicos.

Unidad IV: Propiedades de las galaxias pobladoras de voids y de sus entornos

Propiedades astrofísicas de galaxias en voids cósmicos: colores, luminosidades, tasas de formación estelar, brillos superficiales, núcleos activos. Funciones de masa y luminosidad de galaxias en voids. Grupos de galaxias en voids y regiones de baja densidad global. Propiedades de galaxias en grupos pobladores de voids. Interacciones y pares de galaxias en voids.

Unidad V: El void local

Representación del Universo local con sus componentes a gran escala: grupo local, cúmulos vecinos, void local. Galaxias conocidas en el void local. Desafíos observacionales. Efecto de la expansión del void local en la dinámica de las galaxias, en particular la Vía Láctea. Campo de velocidades peculiares observacionales en el entorno al grupo local. Velocidad peculiar del grupo local y de nuestra Galaxia. Movimientos de corriente a gran escala en el Universo local. Interpretaciones más aceptadas de la velocidad del grupo local de galaxias. El rol del void local en la dinámica del Universo cercano y en las propiedades de las galaxias

PRÁCTICAS

Se realizarán trabajos de investigación que serán parte de la evaluación final.

BIBLIOGRAFÍA

Se utilizarán principalmente artículos publicados en revistas internacionales con referato (MNRAS, ApJ, Nature, A&A, etc).

Los temas básicos de estructura a gran escala del Universo se basaran en "Large scale structure of the Universe" P.J.E. Peebles (Princeton University Press, 1980), Cosmological Physics, John Peacock (Cambridge University Press, 1998)

MODALIDAD DE EVALUACIÓN

La evaluación consistirá en un examen final individual y abarcativo del contenido del curso y en la realización de un trabajo práctico de investigación sobre temas afines al contenido del curso.

REQUERIMIENTOS PARA EL CURSADO

Ser estudiante de doctorado en astronomía, física o computación, y tener formación equivalente en matemática y física.

TÍTULO: Fundamentos de Relatividad Numérica y Astrofísica Relativista			
AÑO: 2026	CUATRIMESTRE: 1°	N° DE CRÉDITOS: 3	VIGENCIA: 3 años
CARGA HORARIA: 60 horas de teoría y 60 horas de práctica			
CARRERA/S: Doctorado en Astronomía, Doctorado en Física			

FUNDAMENTOS

La relatividad numérica constituye hoy una de las herramientas fundamentales para el estudio de la física de los sistemas auto-gravitantes en el régimen no-lineal de la relatividad general. El desarrollo de formulaciones bien puestas de las ecuaciones de Einstein, junto con el avance en técnicas de integración numérica y en el poder de cómputo, ha permitido abordar con precisión fenómenos de alta energía como la coalescencia de agujeros negros y estrellas de neutrones, la generación de ondas gravitacionales, la dinámica de plasmas relativistas y la emisión electromagnética en entornos extremos. El presente curso tiene como propósito proporcionar una introducción a los fundamentos teóricos y metodológicos de la relatividad numérica, así como en los aspectos esenciales de la astrofísica relativista. Se busca que el estudiante desarrolle la capacidad de aplicar estas herramientas al estudio de procesos astrofísicos en objetos compactos tales como agujeros negros, estrellas de neutrones y sistemas binarios, con especial énfasis en la conexión con observaciones actuales.

OBJETIVOS

El curso tiene por objetivo brindar elementos de relatividad numérica y astrofísica relativista, orientada al estudio teórico y computacional de objetos compactos. Se busca que el estudiante comprenda la formulación 3+1 de las ecuaciones de Einstein, adquiera destrezas en la construcción y evolución de datos iniciales, y sea capaz de aplicar métodos analíticos y numéricos al análisis de fenómenos astrofísicos en entornos de objetos compactos como agujeros negros y estrellas de neutrones.

PROGRAMA

Unidad I: Repaso de conceptos de relatividad general

Agujeros negros. Ecuaciones TOV. Estrellas de neutrones; ecuaciones de estado. Radiación gravitacional.

Unidad II: Formulación 3+1 de ecuaciones de Einstein

Descomposición 3+1: Foliaciones; Curvatura Extrínseca. Ecuaciones Gauss-Codazzi; Ecuaciones de Vínculo y Evolución. Ecuaciones ADM. Condiciones de Gauge: maximal slicing, gauge armónico.

Unidad III: Datos Iniciales

Clasificación de PDEs. Transformaciones conformes. Descomposición conforme transverse-traceless. Descomposición conforme thin-sandwich. Masa, momento y momento angular.

Unidad IV: Formulaciones de relatividad numérica

Problemas bien puestos e hiperbolicidad. Formulación BSSN; formulación armónico generalizado; formulación Bona-Masso Z4/CCZ4. Extracción de Ondas Gravitacionales.

Unidad V: Breve introducción a métodos numéricos

Diferencias Finitas. Integración Temporal. Condiciones de Contorno. Condición de

Courant-Friedrichs-Lewy. Adaptive-mesh-refinement.

Unidad VI: Ecuaciones de materia en relatividad general y propagación de señales electromagnéticas

Campo Escalar. Hidrodinámica. Magneto-hidrodinámica (MHD). Electrodinámica Force-Free. Transporte Radiativo. Propagación de señales electromagnéticas en vacío y en plasmas. Dispersión. Rotación de Faraday. Lentes gravitacionales: ecuaciones de lentes fuerte y débiles; curvas críticas, cáusticas; time delay; formación de múltiples imágenes: arcos; aproximación analítica perturbativa.

Unidad VII: Astrofísica relativista en agujeros negros

Discos de Acreción en agujeros negros, discos delgados de Shakura-Sunyaev y de Novikov-Thorne-Page, AGNs y el mecanismo de Blandford-Znajek. Procesos radiativos en agujeros negros. Polarización. Ensanchamiento de líneas de hierro. Reconstrucción de imagen, trazado de rayos: métodos analíticos y numéricos.

Unidad VIII: Astrofísica relativista en estrellas compactas y sistemas binarios

Púlsares. Magnetares. Estrellas de Bosones. Sistemas binarios compactos; astronomía de mensajeros múltiples. Curvas de luminosidad. Trazado de rayos. Clasificación de Belobodorov.

PRÁCTICAS

Las actividades prácticas consistirán en la resolución de guías de problemas teóricos-prácticos y desarrollo de prácticas con simulaciones numéricas.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) Baumgarte, Thomas W., and Stuart L. Shapiro. "Numerical relativity: solving Einstein's equations on the computer." Cambridge University Press, 2010.
- 2) Shibata, Masaru. "Numerical relativity." Vol. 1. World Scientific, 2015.
- 3) Alcubierre, Miguel. "Introduction to 3+ 1 numerical relativity." Vol. 140. OUP Oxford, 2008.
- 4) Bona, Carles, Carlos Palenzuela-Luque, and Carles Bona-Casas. "Elements of numerical relativity and relativistic hydrodynamics: from Einstein's equations to astrophysical simulations." Vol. 783. Springer Science & Business Media, 2009.
- 5) Gourgoulhon, Eric. "3+ 1 formalism in general relativity." Springer, 2012.
- 6) G. Romero and G. Vila. "Introduction to Black Hole Astrophysics". Springer, 2014.
- 7) Kaspi, Victoria M., and Andrei M. Beloborodov. "Magnetars." Annual Review of Astronomy and Astrophysics 55, no. 1 (2017): 261-301.
- 8) Philippov, A., and M. Kramer. "Pulsar magnetospheres and their radiation." Annual Review of Astronomy and Astrophysics 60, no. 1 (2022): 495-558.
- 9) Baumgarte, Thomas W., and Stuart L. Shapiro. "Numerical relativity: starting from scratch." Cambridge University Press, 2021.
- 10) Meneghetti, Massimo. "Introduction to gravitational lensing: with Python examples." Vol. 956. Springer Nature, 2021.
- 11) Kato, S. ; Fukue, J. ; Mineshige, S. "Black-Hole Accretion Disks. Towards a New Paradigm". Kyoto University Press. 2008.
- 12) Lindquist, Richard W. "Relativistic transport theory." Annals of Physics 37, no. 3 (1966): 487-518.

--

MODALIDAD DE EVALUACIÓN

Para regularizar se deberán entregar una guía de problemas teórico-prácticos (desarrollos analíticos y numéricos) que deberán ser entregados al finalizar el cursado. Para aprobar el curso, los estudiantes deberán además exponer oralmente un trabajo o conjunto de trabajos que expliquen algún tema relacionado con la materia en donde se apliquen conceptos integradores de la misma. Las temáticas serán acordadas con los docentes. En la exposición deberán mostrar solvencia no sólo en el material específico trabajado sino también en los conceptos generales estudiados.

REQUERIMIENTOS PARA EL CURSADO

- | |
|--|
| <ol style="list-style-type: none">1) Conocimientos básicos de Relatividad General al nivel de los primeros 6 capítulos de General Relativity de Robert Wald o bien Spacetime and Geometry de Sean Carroll.2) Conocimientos de electromagnetismo al nivel de Electromagnetismo II (FAMAF).3) Conocimientos básicos de programación. |
|--|

TÍTULO: Hamiltonianos Promedio en Resonancia Magnética			
AÑO: 2026	CUATRIMESTRE: 1°	N° DE CRÉDITOS: 3	VIGENCIA: 3 años
CARGA HORARIA: 60 horas de teoría y 60 horas de práctica			
CARRERA/S: Doctorado en Física			

FUNDAMENTOS

En el campo de la RMN se ha aprendido a controlar las interacciones mediante métodos sofisticados, entre ellos las secuencias multi-pulsos. Se pretende describir sistemas de partículas con espín y cómo cambia el sistema en el tiempo a través de operaciones unitarias del operador densidad bajo la acción de un Hamiltoniano. Realizaremos experimentos en los que la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo es controlada externamente. Estos procedimientos se describen en términos de la teoría de Hamiltoniano promedio. Se discutirá la excitación y evolución de coherencias de cuantos múltiples. El objetivo es tener recursos conceptuales para abordar trabajos actuales de interés.

OBJETIVOS

Tener recursos conceptuales para abordar trabajos actuales de interés. Reproducir el cálculo de algunos Hamiltonianos promedios ampliamente utilizados en RMN. Entender sus alcances y limitaciones.

PROGRAMA

Unidad I: Unidad 1

Dinámica de sistemas de espines nucleares. Ecuaciones de movimiento. Operador densidad. Representación de Schrödinger y Heisenberg. Espacio de operadores de Liouville. Productos de operadores de espín. Transformaciones para un cambio de fase por pulsos de radio frecuencia. Transformaciones bajo la acción de términos bilineales. Operadores de transición. El Hamiltoniano de espín nuclear.

Unidad II: Unidad 2

Manipulación de Hamiltonianos de espines nucleares. Teoría de Hamiltoniano promedio. Promediación por perturbaciones dependientes del tiempo. Interacciones cíclicas. Truncamiento de Hamiltonianos internos. Expansión de Magnus.

Unidad III: Unidad 3

Descripción cuántica de espectroscopía Fourier. Sistemas de no equilibrio. Operadores productos de espines. Transiciones de cuantos múltiples. Dinámica de cuantos-múltiples. Recorriendo el espacio de Liouville.

Unidad IV: Unidad 4

Discusión de secuencias multi-pulsos en RMN: FID, Eco de Hahn, secuencia de Carr-Purcell. Secuencias para RMN de alta resolución en sólidos: WAHUA; MREV. Análisis en la terna rotante.

Unidad V: Unidad 5

Reversión temporal. Eco mágico. Ecos de Loschmidt. Secuencias ME, dipolar revertida, DQ (double quantum) revertida. Escaneo de interacciones. Fourier 2D.

Unidad VI: Unidad 6

Laboratorios: se realizarán prácticas de laboratorio en las cuales los alumnos deberán adquirir conocimiento en la programación de secuencias de pulsos, control de fases de pulsos de radiofrecuencia, análisis de propagación de errores por acumulación de fases y realización de experimentos de reversión temporal con análisis de coherencias cuánticas múltiples y su aplicación en caracterización de sistemas complejos.

PRÁCTICAS

Se trabajará en los equipos del laboratorio de LANAIS. Implementando la programación de secuencias en los diferentes equipos, y el posterior análisis de datos. FID, Desacople dinámico, WAHUHA, escaleo de la dinámica, reversión, Ecos de Loschmidt, OTOC y distribución de coherencias.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

- Ernst, Bodenhausen and Wokaun, "Principles of Nuclear Magnetic Resonance in one and two dimensions", International Series of monographs on Chemistry 14, Oxford Science Publications, 1987
- Munowitz, "Coherence and NMR", John Wiley & Sons, 1988
- Haeberlen, "High resolution NMR in solids, selective averaging", Advance in Magnetic Resonance, Academic Press, 1976.

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

- Mehring, "Principles of High resolution NMR in solids", Springer-Verlag, second edition, 1983.
- Slichter, "Principles of Magnetic Resonance", Springer-Verlag, third edition, 1990.
- Baum, Munowitz, Garroway, Pines , "Multiple quantum dynamics in solid state NMR", J. Chem. Phys. 83 (5) pg 2015.

MODALIDAD DE EVALUACIÓN

Aprobar los trabajos prácticos de laboratorio implementados. Exposición de una publicación representativa del curso, que le será asignada.

REQUERIMIENTOS PARA EL CURSADO

conocimientos de mecánica cuántica.

TÍTULO: Imágenes por Resonancia Magnética			
AÑO: 2026	CUATRIMESTRE: 1°	N° DE CRÉDITOS: 3	VIGENCIA: 3 años
CARGA HORARIA: 60 horas de teoría y 20 horas de práctica			
CARRERA/S: Doctorado en Física			

FUNDAMENTOS

La imágenes por resonancia magnética, o MRI por sus siglas en inglés (Magnetic Resonance Imaging) es una técnica con aplicaciones en diversos campos de investigación y en el área de salud. La particularidad que caracteriza a esta técnica es su carácter no invasivo y no destructivo. Los espines nucleares son excitados por ondas de radiofrecuencia y la señal inducida por los mismos es adquirida. Dichas señales cuantifican la cantidad de materia y mediante sus tiempos de relajación puede inferirse el entorno en el cual se encuentran la misma. Esta característica de no invasividad y de contraste por relajación ha hecho que esta sea una técnica fundamental en el diagnóstico por imágenes en clínica. También se encuentran múltiples aplicaciones en el estudio y caracterización de alimentos, flujos, absorción de agua en suelos entre otras.

OBJETIVOS

El objetivo del curso es lograr una comprensión cabal de los procesos físicos subyacentes en la adquisición de imágenes por resonancia magnética, tanto desde el punto de vista de los procesos cuánticos involucrados como de la aparatología requerida. Se hará énfases en las técnicas de adquisición y filtrado de datos, y en la adquisición rápida de imágenes.

PROGRAMA

Unidad I: Principios básicos de Imágenes por RMN

Interacción del espín nuclear con un campo magnético
 Espectroscopía
 Tiempos de relajación
 Promedios de señales y relación señal ruido
 Ciclados de fases
 Medición de T1
 Medición de T2

Unidad II: Influencia de Gradientes de Campo Magnéticos

Espacios conjugados y reconstrucción
 Excitación selectiva
 Imágenes 1D
 Imágenes 2D. Espacio de las fases.
 Imágenes de Fourier
 Proyección Reconstrucción
 Dominios temporales y de frecuencia
 Imágenes utilizando ecos:
 STEAM
 CHESS
 FLASH
 EPI

Unidad III: Imágenes de alta resolución

Sensitividad, movimiento y resolución

SNR en imágenes

Influencia del uso de filtros

Aliasing

Resolución limitada por T2.

Resolución limitada por Difusión

Resolución limitada por Corrimientos Químicos

Unidad IV: Medición de movimientos

Introducción a dinámica traslacional

Efectos del movimiento de espines la fase de la señal.

Función de probabilidad condicional y difusión

Correlación por desplazamiento, medición de velocidades.

Ecos de Gradiente

Pulsed Gradient Spin Echo (PGSE)

Aproximación de pulsos angostos.

Pulsos finites, autodifusión y flujo.

Gradientes efectivos

El método de los cumulantes

Unidad V: Elementos de Microscopía por RMN

El sistema

Imanes superconductores y de bajo campo.

Gradientes de campo, diseño de bobinas.

Campos de radiofrecuencia, diseño de bobinas.

PRÁCTICAS

Se realizarán cinco actividades prácticas consistentes en la simulación de imágenes para comprender fenómenos tales como aliasing, distorsiones, filtros, y secuencias rápidas. Los prácticos se aprobarán mediante la entrega de un informe.

BIBLIOGRAFÍA

Principles of Nuclear Magnetic Resonance Microscopy. P. Callaghan. Clarendon Press, Oxford, 1991

Magnetic Resonance Imaging, Principles an Sequence Design. E. Haacke, R. Brown, M. Thompson, R. Venkatesan, Wiley 1999.

MODALIDAD DE EVALUACIÓN

La regularidad se logrará con la aprobación de cuatro de los cinco informes. El examen final consistirá en el desarrollo de un práctico especial el cual deberá ser entregado de forma escrita y defendido en modalidad oral.

REQUERIMIENTOS PARA EL CURSADO

Se requieren conocimientos de mecánica cuántica.

TÍTULO: Introducción a la Información Cuántica			
AÑO: 2026	CUATRIMESTRE: 1°	N° DE CRÉDITOS: 3	VIGENCIA: 3 años
CARGA HORARIA: 60 horas de teoría y 15 horas de práctica			
CARRERA/S: Doctorado en Física			

FUNDAMENTOS

El curso introduce los conceptos y herramientas fundamentales de la teoría de la información cuántica: representación de estados y operaciones, medidas de información y entropía cuántica, entrelazamiento, canales cuánticos y una primera aproximación a algoritmos y protocolos cuánticos. El curso está diseñado para brindar, por un lado, una base teórica sólida, indispensable para la investigación en física cuántica y ciencias de la información, y, por otro, competencias prácticas iniciales en programación y simulación de circuitos cuánticos mediante Qiskit.

En un contexto de rápido desarrollo de las tecnologías cuánticas y la disponibilidad creciente de plataformas accesibles de cómputo cuántico, este curso brinda herramientas teóricas y prácticas fundamentales que complementan la formación actual de estudiantes de física y disciplinas afines, en un área estratégica tanto para la investigación fundamental como para el desarrollo tecnológico.

OBJETIVOS

Familiarizar a las y los estudiantes con el lenguaje matemático de la información cuántica y sus nociones centrales: estados, operaciones, mediciones y medidas de información.

Analizar el entrelazamiento y las correlaciones cuánticas como recursos fundamentales para la transmisión y el procesamiento de información.

Introducir los modelos de cómputo cuántico y los protocolos elementales, como la teleportación y la codificación superdensa.

Proporcionar herramientas prácticas básicas en Qiskit que permitan diseñar, simular y ejecutar circuitos cuánticos simples.

PROGRAMA

Unidad I: Teoría clásica de la información

Breve introducción a la teoría clásica de la información.

Unidad II: Conceptos básicos y formalismo

Repaso del formalismo de la Mecánica Cuántica: Postulados, espacio de Hilbert, operadores, medición. Sistemas compuestos y producto tensorial. Estados puros y mixtos. Matrices densidad. Qubits y operaciones cuánticas: Notación de Dirac y la base computacional. Puertas unitarias: Pauli, Hadamard, fase, CNOT. Circuitos cuánticos. Representación gráfica. Medición proyectiva y POVMs. Canales cuánticos y operaciones completamente positivas. Introducción cualitativa a la decoherencia.

Unidad III: Herramientas y protocolos de información cuántica

Medidas y teoremas fundamentales de información cuántica: Entropía de von Neumann. Entropía condicional, mutua, coherencia cuántica. Teoremas fundamentales: No-clonación, no-borrado, Holevo. Entrelazamiento y correlaciones: Entrelazamiento bipartito, criterios de separabilidad y medidas de entrelazamiento (estados puros y estado mixtos). Sistemas multipartitos: estados GHZ y W, clases de equivalencia y nociones básicas de monogamia. Protocolos fundamentales: Teleportación y codificación superdensa (protocolos y análisis de recursos). Criptografía Cuántica.

Unidad IV: Computación cuántica: fundamentos

Modelo de circuito cuántico: Qubits, compuertas y mediciones como recursos computacionales. Universalidad de conjuntos básicos de puertas. Construcción de circuitos para operaciones compuestas. Algoritmos cuánticos elementales: Algoritmo de Deutsch–Jozsa, algoritmo de Grover, algoritmo de estimación de fase. Recursos y límites: Complejidad, ventajas cuánticas en problemas concretos (visión general).

Unidad V: Taller práctico: Qiskit y programación cuántica

Introducción a Qiskit. Instalación, estructura, simuladores vs backends reales. Construcción de circuitos, mediciones, shots, interpretación de histogramas. Implementación y simulación de protocolos vistos en clases (teleportación, superdense coding, Deutsch–Jozsa).

PRÁCTICAS

Se realizarán guías de problemas típicos de las unidades I-IV que serán revisados en consultas destinadas a las actividades prácticas y la unidad V incluirá la implementación de alguno de los protocolos vistos en clase.

BIBLIOGRAFÍA

Básica:

M. A. Nielsen & I. L. Chuang, Quantum Computation and Quantum Information, Cambridge University Press (2000). — Texto principal.

Complementaria:

J. Preskill, Lecture Notes on Quantum Computation (apuntes).

J. Watrous, The Theory of Quantum Information (Cambridge).

Qiskit Textbook (IBM Qiskit online textbook and tutorials) — materiales prácticos y notebooks.

Artículos de revisión seleccionados que serán provistos durante el curso.

MODALIDAD DE EVALUACIÓN

Habrán dos evaluaciones parciales durante la cursada, y un trabajo práctico final con defensa oral.

REQUERIMIENTOS PARA EL CURSADO

Se requieren conocimientos de álgebra lineal, conocimientos básicos de probabilidad y estadística y conocimientos de física cuántica.

TÍTULO: Sistemas de Tiempo Real			
AÑO: 2026	CUATRIMESTRE: 1°	N° DE CRÉDITOS: 3	VIGENCIA: 3 años
CARGA HORARIA: 45 horas de teoría y 45 horas de práctica			
CARRERA/S: Doctorado en Ciencias de la Computación			

FUNDAMENTOS

En el actual paradigma tecnológico, los sistemas embebidos —sistemas computacionales de propósito específico— han trascendido su rol secundario para erigirse como el centro neurálgico de innovaciones como el Internet de las Cosas (IoT), el Edge Computing y la Industria 4.0. Son el motor de aplicaciones tan diversas como la robótica, la automatización de procesos y los sistemas de misión crítica en la automoción, la energía y la medicina. Esta centralidad ha elevado su complejidad a un nivel que desborda los modelos de programación tradicionales ("bare-metal") basado en bucles infinitos, demandando un enfoque más riguroso y sistemático donde la gestión de tareas concurrentes con restricciones temporales estrictas es la norma.

Este curso se posiciona precisamente en la intersección de la Ingeniería de Software, la Arquitectura de Computadoras y los Sistemas Operativos para abordar dicha complejidad. Se parte de la premisa de que la gestión de la concurrencia, la sincronización y, fundamentalmente, la predictibilidad temporal, no constituyen meros desafíos de implementación, sino que son el objeto de estudio de una disciplina formal dentro de las Ciencias de la Computación: los Sistemas de Tiempo Real. Con este fin, se proporcionan al estudiante los fundamentos teóricos para analizar el comportamiento de sistemas con restricciones temporales, estudiando los problemas clásicos de la concurrencia (inversión de prioridad, deadlocks) y los algoritmos de planificación que los resuelven.

Como herramienta práctica para materializar estos conceptos, el curso se enfoca en el uso de un Sistema Operativo de Tiempo Real (RTOS), específicamente FreeRTOS, el estándar de-facto en la industria. Al implementar soluciones sobre hardware real, el estudiante no se limita al uso instrumental de una tecnología de alta demanda laboral, sino que avanza hacia una conexión real entre la teoría y la práctica. FreeRTOS se convierte así en el entorno para experimentar con algoritmos de planificación, medir latencias y validar el comportamiento temporal de un sistema, habilidades indispensables para el diseño de sistemas embebidos robustos, escalables y mantenibles.

OBJETIVOS

Objetivo General

Desarrollar en el estudiante la capacidad de diseñar, implementar y validar sistemas embebidos con restricciones de tiempo real, aplicando principios teóricos de sistemas operativos y concurrencia para la creación de soluciones robustas y eficientes.

Objetivos Específicos

- Analizar los principios de la programación concurrente y los mecanismos de un RTOS (tareas, semáforos, mutexes, colas) para la gestión de recursos y la sincronización en sistemas de tiempo real.
- Aplicar la API de un RTOS para codificar y depurar aplicaciones multitarea sobre hardware embebido, gestionando la ejecución concurrente de tareas y el manejo de interrupciones.

PROGRAMA

Unidad I: Fundamentos de los Sistemas de Tiempo Real

Introducción a los Sistemas Embebidos. Limitaciones del enfoque "super-loop". Conceptos de Tiempo Real: Tareas, eventos, deadlines, latencia, jitter. Clasificación: Sistemas Hard, Firm y Soft Real-Time. Arquitectura de un RTOS (Kernel). Servicios del sistema. Recursos de hardware asociados. Introducción a FreeRTOS: Filosofía, arquitectura y licenciamiento.

Unidad II: Gestión de Tareas

El concepto de Tarea (Task). Estados de una tarea: Running, Ready, Blocked, Suspended. Creación y eliminación de tareas. Parámetros: prioridad, stack. El Planificador (Scheduler): Algoritmos de planificación. Preemptive vs. Cooperative scheduling. El "Context Switch". La tarea "Idle" y "hooks". Gestión de memoria heap: asignación dinámica de memoria

Unidad III: Sincronización y Comunicación entre Tareas

El problema de los recursos compartidos. Secciones críticas y condiciones de carrera. Mutexes para exclusión mutua. El problema de la inversión de prioridad. Semáforos: Binarios (para sincronización) y contadores (para gestión de recursos). Colas de Mensajes (Queue) para la comunicación segura de datos entre tareas. Timers por software, notificaciones de tareas y grupos de eventos. Delays

Unidad IV: Gestión de Interrupciones y Recursos

Interrupciones en un entorno RTOS. Prioridades de interrupción vs. prioridades de tareas. Funciones de API seguras para ISR. Estrategias de manejo: Procesamiento diferido de interrupciones. Gestión de memoria en RTOS: esquemas de asignación heap. Modos de bajo consumo y el "Tickless Idle Mode". Gestión de recursos: secciones de código críticas, suspensión del planificador.

Unidad V: Diseño y Análisis de Sistemas

Patrones de diseño comunes en sistemas de tiempo real. Técnicas de depuración para sistemas concurrentes. Herramientas de visualización y trazado. Introducción a la configuración y porting de un RTOS. Interfaces estándares de periféricos

PRÁCTICAS

Las actividades prácticas son el eje central de este curso y están diseñadas para materializar los conceptos teóricos discutidos en clase. El enfoque es eminentemente práctico y basado en proyectos, donde el estudiante deberá resolver problemas reales sobre hardware embebido. El objetivo es que, de forma incremental, el estudiante construya un sistema complejo, desarrollando competencias en diseño, implementación, depuración y validación de software de tiempo real.

El curso se estructura alrededor de las prácticas de laboratorio y los proyectos que serán utilizados para evaluación de los alumnos.

Las clases prácticas, de tres horas semanales, se llevarán a cabo en el Laboratorio de Electrónica (Lab 126). Cada grupo de trabajo contará con: Una computadora personal con el entorno de desarrollo integrado (IDE), compilador y herramientas de depuración necesarias. Una placa de desarrollo basada en un microcontrolador de 32 bits (STM32 Discovery o similar) y un conjunto de sensores y actuadores básicos para interactuar con el entorno físico. Se prevee el uso compartido de instrumental de laboratorio como osciloscopios para la visualización y medida de señales temporales.

La supervisión será continua y adaptada para cada tipo de actividad:

- Trabajos Prácticos Guiados, asociado a un módulo teórico y consistirá en un problema guiado que los estudiantes resolverán en grupos de dos.
- Proyecto Final Integrador: Esta actividad se desarrollará en grupos reducidos de estudiantes (conforme a su complejidad) durante el último tramo del curso. La supervisión se realizará mediante hitos de avance periódicos. En estas reuniones, cada grupo presentará su progreso, discutirá decisiones de diseño y recibirá retroalimentación directa del profesor.

BIBLIOGRAFÍA

BÁSICA:

"Mastering the FreeRTOS™ Real Time Kernel: A Hands-On Tutorial Guide", Richard Barry. Release Version - 1.1.0, Real Time Engineers Ltd, (2024).

"Embedded System Design with Arm Cortex-M Microcontrollers: Applications with C, C++ and MicroPython", Cem Ünsalan, Hüseyin Deniz Gürhan, Mehmet Erkin Yücel. Ed. Springer Nature Switzerland AG (2022).

COMPLEMENTARIA:

"Reference Manual for FreeRTOS version 10.0.0 issue 1". Amazon Inc., (2017).

"Electronics for Embedded Systems", Ahmet Bindal, Ed. Springer International Publishing, Switzerland, (2017).

MODALIDAD DE EVALUACIÓN

Los exámenes parciales serán instrumentados mediante la presentación de los trabajos prácticos guiados y de avance del proyecto integrador, junto a sus informes correspondientes. Es condición para la obtención de la regularidad la presentación de la totalidad de las actividades prácticas propuestas.

El examen final consistirá en la defensa individual de un Proyecto Integrador, que consiste en el desarrollo de un sistema de tiempo real de mediana complejidad, de aplicación práctica, implementado mediante la utilización de una plataforma embebida, que resuelva un problema real. Se prevé la evaluación de su informe escrito correspondiente y una defensa oral del trabajo realizado.

En la evaluación se considerará los siguientes aspectos:

- Funcionalidad y Robustez: Cumplimiento de todos los requerimientos especificados.
- Calidad del Diseño de Software: Modularidad, claridad y correcta aplicación de los primitivos del RTOS.
- Documentación Técnica: Informe final que detalle la arquitectura de software, las decisiones de diseño y los resultados de las pruebas.
- Defensa Oral: Presentación y demostración funcional del proyecto, con preguntas por parte del docente.

REQUERIMIENTOS PARA EL CURSADO

Conocimientos básicos de programación y estructuras de datos en lenguaje "C/C++"

TÍTULO: Teoría de Modelos			
AÑO: 2026	CUATRIMESTRE: 1°	N° DE CRÉDITOS: 3	VIGENCIA: 3 años
CARGA HORARIA: 80 horas de teoría y 40 horas de práctica			
CARRERA/S: Doctorado en Matemática, Doctorado en Ciencias de la Computación			

FUNDAMENTOS

La teoría de modelos proporciona herramientas semánticas para el estudio de ciertos lenguajes formales (e.g., lógica de primer orden, lógicas modales, etc.). Además de haberse constituido como un área en sí misma, cuenta con valiosas aplicaciones en otras áreas, como el álgebra universal, la teoría de conjuntos y la complejidad computacional, etc.

OBJETIVOS

El objetivo principal del curso es que los/as estudiantes adquieran familiaridad con las herramientas básicas de la teoría de modelos de la lógica de primer orden. Entre estas se destacan: diagramas, productos y cocientes, ultraproductos, submodelos elementales y cadenas de modelos.

PROGRAMA

Unidad I: Introducción

Repaso de lógica de primer orden. Nociones básicas de teoría de conjuntos. Construcción de ordinales y cardinales. Los axiomas de Zermelo-Frenkel.

Unidad II: Conceptos y herramientas básicas

Parámetros y diagramas, mapeos y las fórmulas que preservan, compacidad.

Unidad III: Ultraproductos

Definición y propiedades básicas. El teorema fundamental de los ultraproductos.

Unidad IV: Los teoremas de Löwenheim-Skolem

Los teoremas de Löwenheim-Skolem superior e inferior.

Unidad V: Clasificación de Estructuras

Subconjuntos definibles, clases de estructuras definibles, el teorema de Beth.

Unidad VI: El caso numerable

La construcción de Fraisse, Omitting types, Categoricidad contable.

PRÁCTICAS

Las actividades prácticas consisten en la resolución de ejercicios. La evaluación será por medio de entregas programadas de cada unidad.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA: W. Hodges, Model Theory. Cambridge University Press, 2008, 778 páginas.

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

C.C. Chang, H.J. Keisler, Model Theory. Elsevier, 1990, 650 páginas.

MODALIDAD DE EVALUACIÓN

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">-Dos (2) evaluaciones parciales. Las mismas serán sobre contenidos teórico-prácticos.-Un recuperatorio específico sobre temas no aprobados.-Entrega de ejercicios de las guías prácticas.-La regularidad se alcanza aprobando los dos parciales, o un parcial y el recuperatorio.-El examen final constará de una evaluación integradora sobre los contenidos teóricos y prácticos del curso |
|--|

REQUERIMIENTOS PARA EL CURSADO

Conocimientos de lógica. Conocimientos de estructuras algebraicas (reticulados o grupos)
--

TÍTULO: Espacios de Lebesgue variables pesados y Teoría de extrapolación			
AÑO: 2026	CUATRIMESTRE: 1°	N° DE CRÉDITOS: 3	VIGENCIA: 3 años
CARGA HORARIA: 60 horas de teoría y 20 horas de práctica			
CARRERA/S: Doctorado en Matemática			

FUNDAMENTOS

Los espacios de Lebesgue con exponente variable son espacios de funciones medibles que tienen estructura de espacio de Banach. Son una generalización de los clásicos espacios de Lebesgue L^p . Si bien comparten muchas propiedades entre sí, tienen una notable diferencia y son muy importantes por sus aplicaciones a las ecuaciones en derivadas parciales y a problemas variacionales con condiciones de crecimiento no estándar.

Estos espacios fueron estudiados originalmente en 1931 por Orlicz. Dos décadas después, Nakano desarrolló la teoría de espacios modulares e introduce los espacios $L^{p(\cdot)}$ como un ejemplo de éstos. Independientemente, estos espacios aparecen estudiados en la literatura rusa. Fueron introducidos por Tsenov en 1961, quien consideró el problema de minimizar cierta integral. En 1979 Sharapudinov desarrolló la teoría de espacios funcionales sobre intervalos de la recta real, introduciendo una norma de Luxemburgo. Más aún, fue el primero en considerar cuestiones sobre regularidad de la función exponente e introdujo la condición de continuidad log-Hölder que sería de gran utilidad en desarrollos futuros. A partir de 1982 Zhikov aplicó los espacios de Lebesgue variables al problema del cálculo de variaciones.

El interés en el estudio de estos espacios creció en los años 90 por su utilidad en el estudio de modelos matemáticos de fluidos cuya viscosidad cambia cuando se la expone a un campo eléctrico. Estos espacios también son usados para estudiar el comportamiento de fluidos quasi-newtonianos, en magnetostática, en procesamiento de imágenes, etc.

En la actualidad siguen teniendo un impacto importante en el análisis armónico moderno, por ejemplo en el estudio de la continuidad de ciertos operadores. A esto se le suma la teoría de pesos con exponente variables, la cual enriquece y abre nuevas líneas de investigación.

OBJETIVOS

El objetivo fundamental del curso es poner en contacto al alumno con las ideas y técnicas del estudio del análisis armónico moderno, mediante el estudio topológico de estos espacios de funciones. Se apuntará a la comprensión de técnicas utilizadas en la acotación de ciertos operadores clásicos: la maximal de Hardy-Littlewood, las integrales singulares, entre otros. Además se tratará la teoría de pesos correspondientes a exponentes variables que generaliza lo ya conocido para el caso p constante. Junto a eso, se mostrarán algunos resultados de extrapolación, técnica muy útil para el estudio de la continuidad de ciertos operadores en este contexto.

PROGRAMA

Unidad I: Estructura topológica

Funciones exponentes. El funcional modular. El espacio $L^{p(\cdot)}$. Desigualdad de Hölder y norma asociada. Teoremas de Embedding. Convergencia en el $L^{p(\cdot)}$. Completitud y subconjuntos densos. El espacio dual de $L^{p(\cdot)}$. El Teorema de diferenciación de Lebesgue.

Unidad II: El operador maximal de Hardy-Littlewood

Propiedades básicas. La descomposición de Calderón-Zygmund. El operador maximal sobre el $L^{p(\cdot)}$. El teorema de la acotación del maximal de Hardy-Littlewood. La condición N_{∞} para un control en el infinito y la condición K_0 para un control local de la función exponente. Una condición necesaria y suficiente para la acotación del operador maximal.

Unidad III: Introducción a los pesos $A_{p(\cdot)}$ y teoría de extrapolación

Definiciones básicas y alternativas para los pesos. La clase $A_{p(\cdot)}$. Propiedades de estos pesos y su relación con la clase log-Hölder continua de funciones exponentes. El espacio de Lebesgue variable pesado. Acotación del operador maximal sobre el $L^{p(\cdot)}$ pesado. Algoritmo de extrapolación de Rubio de Francia y aplicaciones. Teoremas de extrapolación con pesos $A_{p(\cdot)}$. Diversos ejemplos de acotación de clásicos operadores.

Unidad IV: Espacio LlogL variable

Falla de la desigualdad de Young en los $L^{p(\cdot)}$. El espacio $L^{q(\cdot)}(\log L)^{p(\cdot)}$. Aproximaciones de la identidad y teoremas de convergencias. Desigualdad de tipo Young en el $L^{q(\cdot)}(\log L)^{p(\cdot)}$.

PRÁCTICAS

El alumno tendrá que resolver ciertos ejercicios propuestos para reforzar los conceptos dados en clases. Podrá consultar dudas de los mismos en reuniones semanales previamente acordadas.

BIBLIOGRAFÍA

- D. Cruz Uribe y A. Fiorenza. "Variable Lebesgue Spaces", Foundations and Harmonic Analysis, Birkhauser, 2013.
- L. Diening, P. Harjulehto, P. Hästö, M. Ruzicka, "Lebesgue and Sobolev spaces with variable exponents", Lecture Notes in Math. 2017. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, 2011.
- E. Stein, "Singular Integrals and differentiability properties of functions", Princenton University Press, 1970.

MODALIDAD DE EVALUACIÓN

Para la regularidad se exigirá la entrega de una lista de ejercicios, los cuales deberán ser resueltos en un lapso de tiempo determinado (dos semanas).
El examen final y aprobación del curso consistirá en un examen oral con los temas desarrollados en clases.

REQUERIMIENTOS PARA EL CURSADO

Para el curso será necesario tener conocimientos avanzados de funciones reales y topología general.

TÍTULO: Geometría Algebraica			
AÑO: 2026	CUATRIMESTRE: 1°	N° DE CRÉDITOS: 3	VIGENCIA: 3 años
CARGA HORARIA: 60 horas de teoría y 40 horas de práctica			
CARRERA/S: Doctorado en Matemática			

FUNDAMENTOS

La geometría algebraica estudia los conjuntos de ceros de polinomios, llamados variedades algebraicas. Para ello, usa herramientas del álgebra abstracta, como el álgebra conmutativa, para entender las propiedades geométricas de estos objetos. Esta área ocupa un lugar central en la matemática moderna, con múltiples aplicaciones en áreas tan diversas como la teoría de números, la teoría de representaciones y la criptografía.

OBJETIVOS

El objetivo de este curso es que el estudiante adquiera los conceptos básicos sobre variedades algebraicas y proyectivas. Se busca que pueda transitar con fluidez entre el álgebra conmutativa y la geometría, aplicando estos conocimientos a numerosos ejemplos, como curvas y superficies. Además, se introducirán de manera ocasional nociones del lenguaje moderno de esquemas, cada vez más indispensable en el área

PROGRAMA

Unidad I: Álgebra conmutativa

Anillos e ideales. Módulos. Anillos y módulos de fracciones. Anillos noetherianos. Descomposición primaria. Bases de Groebner. Dependencia entera y valoraciones. Condiciones de cadena. Anillos de Artin. Anillos de valoración discreta y dominios de Dedekind. Completaciones. Teoría de la dimensión.

Unidad II: Variedades

Variedades afines. Variedades proyectivas. Morfismos. Mapas racionales. Singularidades. Variedades no singulares. Curvas no singulares. Intersecciones en el espacio proyectivo.

PRÁCTICAS

Se dedicarán dos horas semanales a la resolución de ejercicios en clase. Asimismo, cada semana se asignarán ejercicios, los cuales deberán ser entregados en el transcurso de la siguiente

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía básica

Atiyah, M. F., Macdonald, I. G., Introducción al álgebra conmutativa. Editorial Reverté.

Eisenbud, D., Commutative Algebra with a View Toward Algebraic Geometry. Springer-Verlag.

Hartshorne, R., Algebraic Geometry. Springer-Verlag.

Bibliografía complementaria

Reid, M., Undergraduate Commutative Algebra. Cambridge University Press (London Mathematical Society Student Texts 29).

Vakil, R., The Rising Sea: Foundations of Algebraic Geometry. Princeton University Press.

Zariski, O., Samuel, P., Commutative Algebra, Vol. I y II. Springer-Verlag.

MODALIDAD DE EVALUACIÓN

Para regularizar el curso es necesario presentar y aprobar el 90 % de las tareas semanales. Para aprobar el curso, además de lo anterior, es necesario aprobar un examen final que puede ser escrito u oral.

REQUERIMIENTOS PARA EL CURSADO

Conocimientos sobre anillos conmutativos, ideales y módulos.

TÍTULO: Geometría compleja: el caso compacto y homogéneo			
AÑO: 2026	CUATRIMESTRE: 1°	N° DE CRÉDITOS: 3	VIGENCIA: 3 años
CARGA HORARIA: 60 horas de teoría y 60 horas de práctica			
CARRERA/S: Doctorado en Matemática			

FUNDAMENTOS

La geometría compleja no Kähler es un área relativamente nueva de la geometría diferencial que ha atraído la atención de una vasta comunidad de geómetras en las últimas décadas. A pesar de los grandes avances obtenidos, algunos problemas fundamentales permanecen abiertos, como el de la existencia y unicidad de una métrica "canónica" en una variedad compleja compacta dada, donde el significado del adjetivo canónico es parte del problema.

El caso compacto, homogéneo y Kähler (variedades banderas) es un tópico clásico con aportes de famosos matemáticos como Borel, Koszul, Tits y Griffiths, pero no existe todavía en la literatura un estudio sistemático del caso compacto homogéneo no Kähler. Se destacan los trabajos de Grantcharov y Podestà en el tema.

OBJETIVOS

Introducir al estudiante de doctorado a los nociones básicas de espacios homogéneos compactos, con especial énfasis en el rol que juegan los sistemas de raíces, como así también a las nociones básicas de la geometría Hermitiana. Discutir algunas relaciones que existen entre dichos temas y con otras áreas de la Matemática. El objetivo principal del curso es que al finalizar la materia, los estudiantes estén en condiciones de abordar cualquiera de los innumerables problemas en geometría compleja no Kähler en el marco de los espacios homogéneos compactos, el cual representa una profunda y fructífera interrelación entre la geometría, el álgebra y la topología.

PROGRAMA

Unidad I: Espacios homogéneos compactos

Definición. Ejemplos. Topología. Sistemas de raíces. Variedades banderas. Conexiones y estructuras geométricas invariantes.

Unidad II: Geometría Hermitiana

Variedades complejas. Estructuras Hermitianas. Conexiones canónicas. Definiciones de nociones especiales: LCK, BTP, Chern-Einstein, balanced, SKT, CYT, etc. Relaciones.

Unidad III: Variedades complejas homogéneas

Definición y estructura de C-espacios. Espacio de estructuras complejas invariantes. Primera clase de Chern. Primeros tres números de Betti.

Unidad IV: Variedades Hermitianas homogéneas

Representación de isotropía de un C-espacio. Métricas Hermitianas invariantes. Forma de Kähler. Conexiones de Levi-Civita, Chern y Bismut. Formas de Ricci y tensor de Ricci de Chern.

Unidad V: Métricas Hermitianas especiales en C-espacios

Localmente conforme Kähler. Torsión de Bismut paralela. Chern-Einstein. Balanceada. SKT (pluriclosed). Calabi-Yau con torsión. Relaciones.

PRÁCTICAS

Clases prácticas en el aula. Guías de práctico. Presentación periódica de ejercicios resueltos.

BIBLIOGRAFÍA

G. Grantcharov, Geometry of compact complex homogeneous spaces with vanishing first Chern class, Adv. Math. 226 (2011) 3136-3159.

A. Knapp, Lie groups beyond an introduction, 2nd Edition, Prog. Math. 140 (2002), Birkhauser.

S. Kobayashi, K. Nomizu, Foundations of differential geometry, Volume II, Interscience Publishers (1969).

L. Ni, N. Wallach, Compact, connected, complex manifolds that admit a compact transitive group of holomorphic automorphisms, Acta Math. Sinica, in press.

F. Podesta, Homogeneous Hermitian manifolds and special metrics, Transformation Groups 23 (2018), 1129-1147.

MODALIDAD DE EVALUACIÓN

El examen final consistirá en una evaluación escrita sobre contenidos teóricos y prácticos de la materia.

REQUERIMIENTOS PARA EL CURSADO

Conocimientos básicos de grupos de Lie y de variedades Riemannianas.

TÍTULO: Introducción a las álgebras de Lie y sus representaciones			
AÑO: 2026	CUATRIMESTRE: 1°	N° DE CRÉDITOS: 3	VIGENCIA: 3 años
CARGA HORARIA: 60 horas de teoría y 30 horas de práctica			
CARRERA/S: Doctorado en Matemática			

FUNDAMENTOS

Las álgebras de Lie son la aproximación lineal de los grupos de Lie, que a su vez son los grupos de que admiten una estructura de variedad diferencial compatible con la de grupo y son ubicuos en Matemática y Física.

Los grupos/álgebras de Lie, con sus acciones juegan un papel fundamental en el estudio de "problemas con simetrías" en Geometría, Análisis, Sistemas dinámicos, Física teórica, entre otras.

OBJETIVOS

Este curso tiene como principal objetivo estudiar los conceptos básicos de álgebras de Lie (nilpotentes, solubles, semisimples), la clasificación de las álgebras de Lie semisimples (relacionarla con la de los grupos de Lie compactos), y la clasificación de las representaciones irreducibles de ellas.

PROGRAMA

Unidad I: Conceptos básicos.

Definiciones y ejemplos, álgebras de Lie clásicas, derivaciones.

Homomorfismos e ideales, representaciones, automorfismos interiores.

Álgebras de Lie nilpotentes y solubles, Teorema de Engel y Teorema de Lie.

Unidad II: Álgebras de Lie semisimples

Definiciones y ejemplos, forma de Killing.

Derivaciones interiores y descomposición de Jordan en un álgebra de Lie semisimple.

Completa reducibilidad de representaciones, truco de unitarizabilidad.

Representaciones de $sl(2, \mathbb{C})$.

Subálgebras de Cartan y descomposición en espacios raíces.

Propiedades axiomáticas de las raíces de un álgebra de Lie semisimple.

Sistemas de raíces abstractos y su clasificación. Ejemplos.

Unidad III: Teoremas de isomorfismo y conjugación

Isomorfismos entre sistemas de raíces inducen isomorfismos entre las álgebras del Lie.

Teoremas de conjugación de subálgebras de Cartan y subálgebras Borel.

Unidad IV: Representaciones de álgebras de Lie semisimples

Álgebra universal envolvente de un álgebra de Lie, Teorema de PBW.

Módulos de Verma, módulos de dimensión finita.

Retículo de pesos, pesos fundamentales, Teorema del peso máximo. Ejemplos.

Fórmulas de multiplicidad de pesos y caracteres.

PRÁCTICAS

Las actividades prácticas consistirán en la resolución de ejercicios relacionados con el contenido teórico de la materia. Se prevén clases de consultas semanales.

BIBLIOGRAFÍA

J. Humphreys. Introduction to Lie algebras and representation theory, Springer-Verlag, New York 1972.

N. Andruskiewitsch. Álgebras de Lie semisimples y Representaciones de Dimensión Finita. Trabajos de Matemática Serie B, 1995/30.

R. Goodman and N. Wallach. Symmetry, Representations, and Invariants, Graduate Texts in Mathematics, Springer.

A. Knapp. Lie groups beyond an introduction}. Birkhauser, Boston, 1996.

W. Fukon and J. Harris. Representation Theory, A First Course, Undergraduate Texts in Mathematics, Springer

MODALIDAD DE EVALUACIÓN

Para regularizar: el estudiante deberá entregar periódicamente resoluciones a una lista de ejercicios seleccionados de los trabajos prácticos.

Para aprobar el curso: aprobación de un examen escrito sobre los contenidos teóricos y prácticos del curso.

REQUERIMIENTOS PARA EL CURSADO

Nociones básicas de Variedades Diferenciables y conocimientos sólidos de álgebra Lineal

TÍTULO: Introducción al Análisis Estadístico de Datos Experimentales			
AÑO: 2026	CUATRIMESTRE: 1°	N° DE CRÉDITOS: -----	VIGENCIA: 3 años
CARGA HORARIA: 60 horas de teoría y 20 horas de práctica			
CARRERA/S: No Estructurado			

FUNDAMENTOS

La importancia del análisis estadístico de datos experimentales en la ciencia moderna es fundamental para la toma de decisiones informadas y la generación de conocimiento confiable. En el contexto actual de la investigación y el avance tecnológico, la recopilación de datos es una actividad cotidiana en una amplia gama de disciplinas científicas, desde la biología y la física hasta la economía y la medicina.

El análisis estadístico proporciona las herramientas esenciales para extraer significado y conocimiento a partir de estos datos. Permite a los científicos identificar patrones, tendencias y relaciones que, de otro modo, podrían pasar desapercibidos. Además, desempeña un papel crítico en la evaluación de la validez de los resultados experimentales y en la cuantificación de la incertidumbre asociada con las mediciones.

Además, el análisis estadístico es esencial para la replicabilidad y la reproducibilidad de la investigación científica. Ayuda a garantizar que los hallazgos científicos puedan ser verificados y validados por otros investigadores, lo que es fundamental para el avance del conocimiento y la construcción de teorías sólidas.

OBJETIVOS

El objetivo de este curso es capacitar a los estudiantes en los fundamentos esenciales de la estadística aplicada a la investigación científica, brindándoles las habilidades y herramientas necesarias para recopilar, organizar, analizar y presentar datos de manera efectiva. A lo largo del curso, se busca que los estudiantes comprendan conceptos clave, como la medición de la incertidumbre, la inferencia estadística y la interpretación de resultados, permitiéndoles tomar decisiones informadas basadas en evidencia, evaluar la validez de experimentos y contribuir de manera sólida al avance del conocimiento en sus respectivas disciplinas científicas.

PROGRAMA

Unidad I: Introducción

- 1.1 La importancia del experimento en las ciencias.
- 1.2 Etapas de un experimento típico.
- 1.3 La recopilación de datos durante un experimento.

Unidad II: Mediciones e incertidumbres

- 2.1 Magnitud física y medición.
- 2.2 Apreciación de un instrumento de medición. Apreciación del observador o estimación de la lectura.
- 2.3 Mediciones directas. Mediciones indirectas.
- 2.4 Cifras significativas y redondeo.

Unidad III: Tratamiento estadístico de datos experimentales

3.1 La media y la desviación estándar. La desviación estándar de la media o error estándar. La desviación estándar de la media o error estándar.
3.2 Distribuciones límites. Distribución normal. Distribución normal estándar. Distribuciones normales no estándar. Distribución de la media muestral.
3.3 Estimación puntual e intervalos estadísticos basados en una sola muestra. Estimador puntual. Intervalos de confianza con muestras grandes. Nivel de confianza y precisión.
3.4 Comparación de valores determinados experimentalmente. Propiedades de las distribuciones t.

Unidad IV: Ajuste de una función lineal

4.1 El método de cuadrados mínimos.
4.2 Desviación estándar asociadas a los parámetros de ajustes
4.3 Intervalo de confianza para la pendiente. Ajuste pesado.
4.4 Transformación de funciones en funciones lineales

PRÁCTICAS

Durante el curso se llevarán a cabo actividades prácticas a continuación de las clases teóricas, utilizando guías de problemas específicos. El docente encargado estará presente durante esta actividad

BIBLIOGRAFÍA

- Maldonado González, A. D., Salmerón Cerdá, A. y Cabañas de la Paz, R. (2023). Manual básico de Estadística para Ingeniería Informática. Editorial Universidad de Almería. Online: https://editorial.ual.es/libro/manual-basico-de-estadistica-para-ingenieria-informatica_147799/
- Milton J.S. y Arnold J.C., Probabilidad y Estadística con Aplicaciones para Ingeniería y Ciencias Computacionales, 4ta Ed. McGraw-Hill Interamericana, México.
- Apuntes teóricos. Cátedra Matemática III, Facultad de Informática, UNLP, disponibles online: <https://www.mate.unlp.edu.ar/?s=cur2&c=117>
- J.R. Taylor, An introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements, 2da. ed. (University Science Book, 1997).
- P. Bevington y D. Robinson, Data Reduction and Error Analysis for the Physical Science, 3ra. ed. (Mc. Graw Hill, 2003).
- S.G. Rabinovich, Measurements Errors and Uncertainties: Theory and Practice, 3ra. ed. (Springer, 2005).
- L. Kirkup, Experimental Methods: An Introduction to the Analysis and Presentation of Data (John Wiley & Son, 1997).
- A. Maiztegui y R. Gleiser, Introducción a las Mediciones de Laboratorio, (Editorial Kapeluz, 1980).
- J.L. Devore, Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias, 5ta. ed. (International Thomson, 2001).
- D. Wackerly, W. Mendenhall III y R. Scheaffer, Estadística Matemática con Aplicaciones, 6ta. ed. (International Thomson, 2002).

MODALIDAD DE EVALUACIÓN

La regularidad se obtiene con el 80% de asistencia a las clases teóricas.

Las evaluaciones consisten en dos parciales con problemas similares a los de las guías y una evaluación final integradora.
--

REQUERIMIENTOS PARA EL CURSADO

Conocimientos básicos de análisis matemáticos.
--

TÍTULO: Dosimetría en Radioterapia			
AÑO: 2026	CUATRIMESTRE: 1°	N° DE CRÉDITOS: —	VIGENCIA: 3 años
CARGA HORARIA: 160 horas de teoría y 80 horas de práctica			
CARRERA/S: No Estructurado			

FUNDAMENTOS

Este curso fue oportunamente aprobado también por la Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN), y ha sido entonces reconocido como uno de los requisitos que se exige a médicos para obtener su permiso individual para el empleo de material radiactivo o radiaciones ionizantes en seres humanos, y a técnicos para obtener su licencia como técnico en física de la radioterapia. El curso también está dirigido a otros profesionales que deseen orientar el desarrollo de su carrera hacia la física de la radioterapia.

OBJETIVOS

El propósito de este Curso es brindar los contenidos teóricos que la Autoridad Regulatoria Nuclear exige a médicos y técnicos sobre el empleo de material radiactivo y/o radiaciones ionizantes en seres humanos, lo que a su vez les permite obtener la licencia como “Técnico en Física de la Radioterapia”.

Este Curso está dirigido también a ingenieros o egresados de carreras afines que deseen orientar el desarrollo de su profesión en el área de la Física de la Radioterapia.

PROGRAMA

Unidad I: Repaso de conceptos matemáticos y unidades físicas

Ecuaciones lineales. Representación gráfica de la recta. Función exponencial. Logaritmos. Representación en escala logarítmica. Porcentajes. Interpolación lineal. Unidades de tiempo. Unidades eléctricas, de masa y longitud. Unidades de energía. Sistema internacional de unidades.

Unidad II: Conceptos básicos de física atómica

Principios de física nuclear, el núcleo atómico, composición, estructura. Radiactividad, Leyes de la desintegración radiactiva. Constante de desintegración. Vida media. Período de semidesintegración. Actividad. Definición. Unidades. Radiactividad natural. Series radiactivas. Equilibrios. Tabla de nucleidos. Isotopía. Fuentes artificiales de radiación.

Unidad III: Interacción de la radiación con la materia

Interacción de la radiación electromagnética con la materia. Efectos fotoeléctrico, Compton y formación de pares. Coeficientes de atenuación y absorción. Descripción de haces de fotones. Atenuación de haces de fotones. Coeficiente de atenuación lineal. Coeficiente de atenuación másica. Energía transferida y energía absorbida. Importancia relativa de los diferentes tipos de interacciones.

Unidad IV: Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes

Efectos directos e indirectos. Radiólisis del agua. Formación de radicales libres y fenómenos secundarios. Efectos de las radiaciones sobre el ADN: tipos de lesiones. Reparación del ADN. Efectos de la radiación sobre otras moléculas. Muerte celular por radiación.

Efectos a nivel celular y molecular. Curvas de sobrevivencia. Su uso para el estudio de EBR, efecto de tasa de dosis y fraccionamiento, radiosensibilidad de distintos tipos celulares (normales y transformadas) y etapas del ciclo celular, acción de radioprotectores y

radiosensibilizantes, efecto del oxígeno.

Efectos a nivel del organismo.

Efectos determinísticos: irradiación a todo el cuerpo y localizada, síndromes agudos de radiación, efectos determinísticos tardíos.

Efectos estocásticos somáticos. Mecanismos de oncogénesis. Curvas de probabilidad de efecto vs dosis para alta TLE y baja TLE. Efecto de la tasa de dosis. Estudios epidemiológicos.

Efectos estocásticos hereditarios. Efectos de la irradiación prenatal.

Clasificación y caracterización de tumores. Complicaciones clínicas más frecuentes en los tratamientos.

Dosimetría biológica. Concepto de indicadores y dosímetros biológicos: biofísicos, bioquímicos, citogenéticos. La dosimetría biológica en distintos escenarios de sobreexposición y evaluación: individual y a gran escala, a todo el cuerpo y localizada, inmediata y retrospectiva.

Bases radiobiológicas del fraccionamiento. Modelo α/β . Tejidos con respuesta temprana y tardía. Híper e hipofraccionamiento. Equivalencia entre distintos fraccionamientos. Complicaciones clínicas más frecuentes en los tratamientos.

Unidad V: Conceptos dosimétricos

Concepto físico de kerma y dosis. Transferencia de energía de un haz de radiaciones al medio irradiado. Equilibrio electrónico. Dosis absorbida. Definición y unidades. Relación entre kerma, exposición y dosis absorbida.

Constante específica gamma. Determinación de tasa de dosis y tasa de kerma para fuentes puntuales gamma, beta, alfa y neutrones. Cálculo de dosis acumulada. Caso particular de radionucleidos de vida media corta.

Magnitudes de aplicación en protección radiológica y sus unidades: Dosis absorbida, dosis equivalente y dosis efectiva. Magnitudes operacionales: dosis equivalente personal y dosis equivalente ambiental.

Dosimetría de la contaminación interna. Período físico y biológico. Sistema de cálculo en dosimetría interna ocupacional. Concentración derivada en aire. Límite anual de incorporación para trabajadores y público.

Unidad VI: Producción de rayos x y propiedades de equipos de rayos x

Equipos y propiedades de los rayos x. Tubos de rayos x. Espectros de rayos x: radiación de frenado, rayos x característicos. Distribución angular. Calidad de la radiación. Capa hemirreductora. Filtros. Energía efectiva. Variación de la calidad al modificar el filtro y la tensión aplicada al tubo de rayos x. Variación en la distribución de dosis en el paciente al modificarse el filtro, la tensión, la intensidad de corriente y la distancia del foco a la superficie. Radiación secundaria.

Equipos de rayos x para terapia: terapia superficial y ortovoltaje o terapia en profundidad.

Unidad VII: Equipos de alta energía

Características generales. Definición de isocentro, tamaño de campo, sistema óptico, ángulos de colimador y de brazo (gantry).

Equipos para terapia con fuentes selladas. Características de las fuentes de Co-60. Diseño de colimadores. Penumbra física y penumbra geométrica.

Equipos para terapia con rayos x. Aceleradores lineales de electrones. Características de los haces de fotones y electrones. Principales componentes de un acelerador. Filtro aplanador. Láminas dispersoras para haces de electrones. Determinación de la energía. Colimadores.

Colimadores multilámina.

Comparación de equipos de Co-60 y aceleradores, ventajas y desventajas.

Unidad VIII: Dosimetría de fuentes empleadas en braquiterapia

Características de las fuentes empleadas en braquiterapia. Cálculo de dosis con fuentes lineales. Empleo de radiografías. Planificación de tratamientos en aplicaciones intracavitarias, intersticiales y moldes. Equipos de alta tasa de dosis. Comparación de equipos de baja y alta tasa de dosis.

Unidad IX: Instrumentación para dosimetría

Medición de las radiaciones ionizantes. Cámara de ionización de aire libre. Cámara dedal. Principios de funcionamiento, características, performances. Electrómetros. Cámaras plano-paralelas. Diodos semiconductores. Cámara pozo para braquiterapia. Eficiencia de colección. Saturación. Influencia de las condiciones ambientales. Dosimetría fílmica radiográfica y radiocrómica. Equipamientos de dosimetría in vivo. Sistemas automáticos de barrido de haces. Equipamiento dosimétrico para control de calidad. Equipos dosimétricos para IMRT y radiocirugía.

Instrumentación con fines de protección radiológica: medición de la tasa de dosis absorbida, la tasa de dosis equivalente personal y la tasa de dosis equivalente ambiental. Cámaras de ionización. Contadores proporcionales. Tubos Geiger-Müller. Detectores de centelleo sólido y centelleo líquido. Detectores semiconductores. Detectores termoluminiscentes (TLD), de película y OSL.

Detectores para la medición de la contaminación superficial.

Sistemas de determinación de la incorporación de radionucleídos.

Unidad X: Planificación de tratamientos en terapia estática y cinética

Definición de volumen blanco, volumen de tratamiento y volumen irradiado. Puntos calientes (hot-spots). ICRU50, ICRU 62, ICRU 83.

Simulación y verificación de tratamientos. Importancia de la Inmovilización.

Distancia fuente-superficie fija e isocentro.

Concepto físico y definición de las funciones de radioterapia: PDD, TAR, PSF, TMR, TPR, OF. Variación de las mismas con el tamaño de campo, DFS, energía y profundidad.

Filtros en cuña. Compensadores. Curvas de isodosis para haces de fotones. Variación de las mismas con la energía. Planificación de tratamientos para campos opuestos y paralelos y campos oblicuos.

Contaminación electrónica en haces de fotones.

Curvas de isodosis para haces de electrones. Rango terapéutico para haces de electrones.

Corrección por presencia de heterogeneidades.

Corrección por superficie irregular. Nociones de campos conformados.

Fraccionamiento de la dosis.

Unidad XI: Protección radiológica

Sistema Internacional de Protección Radiológica. Principios de la PR: justificación, optimización de la protección y limitación de dosis.

Restricciones de dosis y niveles de referencia.

Situaciones de exposición: planificadas, existentes, de emergencia. Exposiciones potenciales.

Tipos de exposición: ocupacional, del público, médica.

Protección Radiológica operativa: tiempo, distancia y blindaje.

Cálculo de blindajes en instalaciones de braquiterapia y de teleterapia. Carga de trabajo y su

consecuencia sobre la protección radiológica. Implicancias de las nuevas tecnologías en los cálculos de blindaje (IMRT).

Protección radiológica ocupacional: Áreas de trabajo: supervisadas y controladas. Señalización, control de accesos. Vigilancia radiológica individual y de área. Capacitación del personal en la instalación. Registros.

Protección radiológica del paciente: Aplicación de los principios de la protección radiológica a la exposición médica. Responsabilidades. Justificación genérica e individual. Optimización de la Exposición Médica. Optimización en el diseño de fuentes, equipos e instalaciones. Normas de diseño de equipos para terapia con fuentes selladas y aceleradores lineales de electrones. Optimización en la operación: Procedimientos de seguridad radiológica en la operación de instalaciones de braquiterapia y teleterapia. Códigos de práctica. Calibración de equipos de tratamiento. Dosimetría del paciente. Garantía de calidad en la exposición médica. Restricciones de dosis en investigación biomédica. Protección radiológica de la paciente embarazada. Alta de pacientes con implantes permanentes.

Accidentes radiológicos con fuentes médicas: Análisis de casos. Lecciones aprendidas. Emergencias radiológicas. Manejo de personas irradiadas.

Gestión de residuos y transporte de materiales radiactivos: Definición y clasificación general de residuos radiactivos. Prácticas que los generan. Gestión de residuos radiactivos. Residuos de alta, media y baja. Concepto de exención. Gestión de residuos generados en la práctica médica diagnóstica y terapéutica. Reglamentación del transporte de material radiactivo. Embalajes. Índice de transporte. Señalización para el transporte de material radiactivo. Norma AR 10.16.1

Unidad XII: Garantía de calidad en radioterapia

Garantía de calidad en Radioterapia: Aspectos clínicos y físicos. Protocolos de garantía de calidad en radioterapia (aspectos físicos): IAEA tecdoc 1151. Controles mecánicos y controles de dispositivos de seguridad. Control y verificación de los accesorios de los tratamientos radiantes: cuñas, bloques, plano para mamas, máscaras. Calibración de equipos de terapia radiante. Métodos de calibración. Cadena de medición: Trazabilidad. El laboratorio secundario de estándares. Protocolos para obtener la dosis absorbida en condiciones de referencia y en condiciones distintas a las de referencia. OIEA TRS No.398. Controles dosimétricos rutinarios. Auditorías. Auditorías QUATRO (OIEA).

Unidad XIII: Marco regulatorio

Sistema de regulación nacional: Autoridad Regulatoria Nuclear; funciones, alcances. Normas regulatorias. Norma básica de seguridad radiológica AR 10.1.1. Requisitos para obtener permisos individuales para el ejercicio de prácticas médicas utilizando radiaciones ionizantes. Normas AR 8.11.1 (Permisos individuales para el empleo de material radiactivo o radiaciones ionizantes en seres humanos), AR 8.11.2 (Requisitos mínimos de formación clínica activa para la obtención de permisos individuales con fines médicos) y 8.11.3 (Permisos individuales para especialistas y técnicos e física de la radioterapia). Requisitos para licenciar instalaciones médicas que utilicen radiaciones ionizantes. Normas AR 8.2.1 (Uso de fuentes selladas en braquiterapia), AR 8.2.2 (Operación de aceleradores lineales de uso médico), AR 8.2.3 (Operación de instalaciones de telecobaltoterapia).

Unidad XIV: Prácticas de ejercitación y experimentación

- a) Ejercicios de matemáticas y unidades físicas.
- b) Problemas de física atómica.
- c) Problemas de dosimetría de fuentes gamma.

- d) Resolución de problemas en braquiterapia.
- e) Resolución de problemas en teleterapia estática y cinética.
- f) Observación de aplicaciones en braquiterapia.
- g) Calibración de un equipo de teleterapia. Controles mecánicos y radiantes.
- h) Aplicaciones a esquemas de fraccionamiento utilizando el concepto de NSD (Ellis) y modelo lineal cuadrático (LQM)

PRÁCTICAS

Detalladas en la Unidad 14, las prácticas externas se realizarán en el Centro Médico Deán Funes y en el Hospital Oncológico Provincial Dr. José Miguel Urrutia

BIBLIOGRAFÍA

The Physics of Radiation Therapy, 5a. ed, F. Khan (2014).
Physics and dosimetry of Therapy Electron Beams, S Klevenhagen (1993).
Radiotherapy Physics in Practice J. Williams and D. Thwaites (2000).
The physics of the radiology, H. Johns and J. Cunningham, 5a. ed. (2021).
Treatment Planning in Radiation Oncology, F. Khan and R. Potish (1997).
IAEA Tecdoc 1040: Design and Implementation of a programme: Clinical, medical physics, radiation protection and safety aspects (1988).
IAEA Pub 1296: "Setting up a Radiotherapy Programme: Clinical, Medical Physics, Radiation Protection and Safety Aspect" (2008).
IAEA TRS 398: "Absorbed dose determination en External Beam Radiotherapy" (2000).
Setting up a Radiotherapy Programme (IAEA, 2008).
IAEA Tecdoc 1588: Transition from 2-D Radiotherapy to 3D conformal and Intensity Modulated Radiotherapy (2008).
IAEA HHR No1: ICRU Report 38 (1985): "Dose and Volume Specification for Reporting Intracavitary Therapy in Gynecology".
ICRU Report 58 (1997): "Dose and Volume specification for interstitial Therapy".
ICRU Report 50(1993) "Prescribing, Recording and Reporting Photon Beam Therapy".
ICRU 62 (1999) : Supplement to ICRU Report 50.
ICRU (2010) Report 83: "Prescribing, Recording and Reporting IMRT".
AAPM TG53: Quality assurance for clinical radiotherapy treatment planning (1998).
IAEA: Actualización del Tecdoc 1151.
IAEA Safety Standards Series No. TS-G-1.3 (2011)G3: Normas de Seguridad del OIEA para la protección de las personas y el medio ambiente. Programas de Protección radiológica para el transporte de materiales radiactivo.
IAEA Pub 1297: "Comprehensive Audit of Radioterapy Practices: A tool for Quality Improvement" (2007).
IAEA: "Radiation Oncology Physics: A Handbook for teachers and Students". E. Podgorsak, Tech.Ed. (2003).
IAEA Training Course series 36: "IAEA Syllabus for the education and training of Radiation Oncologists" (2009).

MODALIDAD DE EVALUACIÓN

Tres evaluaciones parciales.
Examen final escrito y oral.

REQUERIMIENTOS PARA EL CURSADO

Licenciados en Bioimágenes, Médicos, Técnicos Radiólogos
Ingenieros y carreras afines

TÍTULO: Introducción a la Neurociencia Teórica y Computacional			
AÑO: 2026	CUATRIMESTRE: 1°	N° DE CRÉDITOS: ----	VIGENCIA: 3 años
CARGA HORARIA: 60 horas de teoría			
CARRERA/S: No Estructurado			

FUNDAMENTOS

Vivimos un momento singular y profundamente disruptivo de la historia humana, en el que las neurociencias nos permiten comprender con creciente precisión el funcionamiento de la mente y del cerebro, mientras que las neurotecnologías, junto con las nuevas capacidades de registro e intervención sobre el sistema nervioso, transforman de manera radical todos los aspectos de nuestra vida y actividad. Esta convergencia entre biología, computación, matemática, física e ingeniería no sólo redefine las fronteras del conocimiento científico, sino que también plantea nuevos interrogantes sobre la naturaleza misma de la cognición, la conciencia y la inteligencia. En este escenario, la neurociencia teórica y la neurociencia computacional se han convertido en componentes esenciales del esfuerzo contemporáneo por construir una comprensión integrada del sistema nervioso.

La neurociencia computacional busca desarrollar modelos matemáticos y algoritmos que describen la dinámica de neuronas, redes neuronales y sistemas cognitivos, permitiendo simular, analizar y predecir comportamientos complejos. Al mismo tiempo, explora las analogías entre los principios del procesamiento biológico de la información y los sistemas artificiales de aprendizaje automático neuronal, estableciendo puentes entre la biología y la inteligencia artificial.

La neurociencia teórica, por su parte, se orienta a formular principios generales y marcos conceptuales que permitan articular los distintos niveles de descripción del sistema nervioso —desde los mecanismos biofísicos de la excitabilidad neuronal hasta los fenómenos emergentes de la percepción, la memoria y la toma de decisiones. Su propósito es generar una comprensión unificada, capaz de integrar datos experimentales dispersos en modelos explicativos coherentes.

El curso “Introducción a la neurociencia teórica y computacional” busca ofrecer ese puente formativo: un espacio de aprendizaje donde los estudiantes puedan aproximarse, con herramientas accesibles pero rigurosas, a los principios fundamentales del modelado neuronal, la simulación computacional y la formalización teórica de los procesos cerebrales y cognitivos.

Para los doctorandos en neurociencias provenientes de disciplinas como la psicología, la medicina, la biología, la filosofía o las ciencias sociales, entre otras, adquirir una formación básica en estos enfoques resulta hoy indispensable. No se trata de una capacitación técnica avanzada, sino de una alfabetización conceptual y metodológica que permita comprender modelos, interpretar resultados y participar activamente en el diálogo interdisciplinario que caracteriza a la neurociencia actual.

Es importante destacar que este curso está orientado principalmente, aunque no de manera exclusiva, a los estudiantes del Doctorado en Neurociencias de la Universidad Nacional de Córdoba, programa del cual la Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación (FaMAF) es parte y fundadora.

Cada doctorando elige una de las cinco áreas de orientación para elaborar su proyecto de tesis (biología de la neurona, sistemas neurobiológicos, neurociencias cognitivas, neurociencias computacionales y teóricas y neuropatologías) y debe completar dos de los cuatro cursos introductorios que no están vinculados con el campo de su trabajo de tesis. Por este motivo, los estudiantes del doctorado en neurociencias que desarrollan sus

investigaciones en el área de Neurociencia Computacional y Teórica no tendrán reconocido este curso como uno de los dos cursos introductorios obligatorios de su doctorado. Como se detalla más adelante, el enfoque conceptual adoptado hace que la propuesta esté dirigida a estudiantes que no provienen de las áreas de matemática, física, astronomía, computación, ingeniería o ciencias económicas, sino de disciplinas como la psicología, la medicina, la biología, la química o las ciencias sociales, entre otras.

OBJETIVOS

El curso tiene como propósito introducir a los estudiantes de doctorado en neurociencias a los fundamentos conceptuales, metodológicos y epistemológicos de la neurociencia computacional y teórica.

Entre sus objetivos específicos se destacan:

1. Comprender los principios básicos del modelado neuronal y de redes neuronales, tanto desde una perspectiva biológica como computacional.
2. Familiarizarse con los principales tipos de modelos teóricos, desde los biológicamente detallados (como los de Hodgkin-Huxley e Integrate-and-Fire) hasta los modelos de sistemas neuronales simplificados utilizados para comprender fenómenos de memoria, aprendizaje y percepción.
3. Desarrollar competencias básicas en el uso de representaciones matemáticas y computacionales, de manera accesible para quienes no poseen formación previa en matemática, computación, física o ingeniería.
4. Explorar las conexiones entre neurociencia e inteligencia artificial, analizando cómo los modelos inspirados en el cerebro han contribuido al desarrollo de algoritmos de aprendizaje automático, y cómo estos, a su vez, ofrecen nuevas herramientas para el estudio de la función cerebral.
5. Promover una mirada crítica y reflexiva sobre los modelos, su poder explicativo y sus límites, fomentando la integración entre aproximaciones experimentales y teóricas.
6. Estimular el pensamiento interdisciplinario, facilitando el diálogo entre neurobiología, psicología, ciencias cognitivas y ciencias de la computación.
7. Desarrollar competencias básicas en el uso de representaciones matemáticas y computacionales, de manera accesible para quienes no poseen formación previa en matemática, física o ingeniería.

PROGRAMA

Unidad I: De la neurona al algoritmo: historia conceptual de la neurociencia teórica y computacional

Los orígenes de la neurociencia moderna. Descubrimiento de la neurona: Ramón y Cajal, la doctrina neuronal y la estructura del tejido nervioso. Modelos tempranos de excitabilidad: Integate-and-Fire y Hodgkin y Huxley, el impulso nervioso y la descripción biofísica de la membrana. Primeras formulaciones teóricas del sistema nervioso como red dinámica. Del sistema nervioso al cálculo simbólico. Cibernética y teoría de la información: Wiener, Shannon y el cerebro como procesador de señales. El modelo de McCulloch y Pitts: neuronas formales y la idea de cómputo lógico. Hebb y la plasticidad sináptica. Aprendizaje como cambio estructural. Modelos de redes y emergencia del aprendizaje automático. Rosenblatt y el perceptrón: aprendizaje estadístico y clasificación. Críticas y redescubrimiento: Minsky, Papert y el renacimiento conexionista. Hopfield y la memoria asociativa: física estadística y dinámica

de redes. Del cerebro al algoritmo: el auge del aprendizaje profundo. La revolución de los años ochenta del siglo pasado. El algoritmo de retropropagación en redes neuronales. El rol de la arquitectura neuronal. Aprendizaje profundo y neurociencia contemporánea: paralelismos, tensiones y límites.

Unidad II: Conceptos centrales de sistemas dinámicos aplicados a la neurociencia

La idea del modelado cuantitativo. El concepto de razón de cambios. La derivada. Las ecuaciones diferencias ordinarias. Lo sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias. Sistemas autónomos y no autónomos. Sistemas de primer orden y de orden superior. El concepto atractor. El efecto de de la dimensionalidad del sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias. Atractores puntos fijos y el análisis lineal de su estabilidad lineal. El caso bidimensional. Oscilaciones, ciclos límites y sincronización neuronal. El caso tridimensional. La aparición de atractores caóticos. El concepto de sensibilidad a las condiciones iniciales. La teoría de bifurcaciones como forma de modelar las transiciones en la excitabilidad. Dinámica caótica en sistemas neuronales: implicancias funcionales

Unidad III: El modelado neuronal

De la biofísica al modelo matemático. El potencial de membrana y las corrientes iónicas: base experimental del modelado. Analogía eléctrica: capacitores, resistencias y corrientes inyectadas. La ecuación diferencial ordinaria para modelar la dinámica del potencial de membrana: interpretación física y geométrica. Espacio de estados y flujos: nociones básicas de dinámica de sistemas biológicos. El modelo de Hodgkin–Huxley como sistema dinámico. Formulación general y significado de las variables y parámetros. Equilibrio, estabilidad y aparición de la excitabilidad como bifurcación dinámica. Análisis cualitativo: diagramas de fase, ciclos límites y umbrales de disparo. Reducción dimensional: de Hodgkin–Huxley al modelo de Izhikevich. Modelos simplificados y su dinámica característica. El modelo de FitzHugh–Nagumo: oscilaciones, pulsos y relajación. Leaky Integrate-and-Fire: potencial subumbral, disparo y reinicio. Interpretación geométrica: dinámica en el plano de fase. Diferencias conceptuales entre modelos continuos y de evento discreto.

Unidad IV: De la neurona a las redes neuronales

Fundamentos del modelado continuo en neurociencias. De la neurona individual al sistema acoplado: ecuaciones diferenciales como descripción del tiempo neuronal. Interacciones sinápticas y acoplamiento de osciladores. Emergencia de patrones colectivos: sincronización, ondas, ritmos. Modelos de poblaciones neuronales y su dinámica global. Conexión con la teoría de redes complejas y la autoorganización. Modelos dinámicos en cronobiología Osciladores neuronales y ritmos circadianos: el núcleo supraquiasmático como marcapasos biológico. Modelos de Goodwin y Forger–Jewett: retroalimentación negativa y generación de ritmos. Acoplamiento de osciladores: sincronización y ajuste de fase. Respuesta a señales externas (zeitgebers): modelado del arrastre lumínico. Aplicaciones: desincronización circadiana, jet lag, cronoterapia y ritmos ultradianos. Modelos continuos de la visión. Modelos dinámicos de la retina: células bipolares, ganglionares y adaptación. Ecuaciones de interacción lateral: contraste, inhibición y realce espacial. Modelos de campo cortical: orientación selectiva y mapas retinotópicos. Dinámica de la percepción visual. Conexión con

modelos de aprendizaje y codificación predictiva. Herramientas conceptuales y computacionales Resolución numérica de EDOs: métodos de Euler y Runge–Kutta. Simulación y visualización de ritmos, sincronización y adaptación sensorial. Interpretación de parámetros biológicos: constantes de tiempo, acoplamiento, ganancia y ruido. Reflexiones conceptuales. Ventajas y límites de los modelos continuos frente a los modelos de eventos discretos. El papel de la dinámica temporal en la percepción y la cognición. Hacia una integración entre modelos biofísicos, poblacionales y de aprendizaje profundo.

Unidad V: Redes neuronales y aprendizaje automático: del cerebro a las máquinas inteligentes

Motivaciones históricas: de McCulloch y Pitts a Rosenblatt. Funciones de activación, pesos y sesgos. Redes feed-forward: estructura jerárquica y propagación de la información. Analogías y límites de la comparación con la biología neuronal. Aprendizaje y optimización. Aprendizaje supervisado, no supervisado y por refuerzo. Función de costo y minimización por gradiente descendente. Algoritmo de retropropagación del error: idea fundamental y motivación biológica. Regularización, generalización y sobreajuste: interpretación estadística. Arquitecturas clásicas del aprendizaje profundo. Redes feed-forward profundas: representación jerárquica y abstracción progresiva. Redes convolucionales: convolución, invariancia y visión artificial; paralelismos con la corteza visual. Redes recurrentes: dinámica temporal, memoria y lenguaje; variantes LSTM y GRU. Transformadores: atención, codificadores-decodificadores y procesamiento paralelo; fundamentos del procesamiento del lenguaje natural y los modelos generativos actuales. Procesamiento de lenguaje natural y grandes modelos de lenguaje. Agentes y RAG.

Unidad VI: El modelado de la percepción y la conciencia

Percepción como inferencia: el cerebro predictivo. Fundamentos de la codificación predictiva (predictive coding) y el cerebro bayesiano. Jerarquías sensoriales y modelos generativos: de la percepción visual a la cognición abstracta. Error de predicción, atención y actualización del modelo interno. Correspondencias con redes neuronales profundas y transformadores: aprendizaje jerárquico y representación latente. Modelos dinámicos de percepción. Redes de atracción y estados metastables como bases de la percepción. Dinámica de acoplamiento entre áreas corticales y oscilaciones gamma, beta y alfa. Modelos de codificación temporal y sincronización como correlatos de integración perceptiva. Modelos contemporáneos de conciencia. Teoría del espacio de trabajo global (Global Workspace Theory, GWT): difusión global de la información y acceso consciente. Teoría de la información integrada (IIT): integración, complejidad y medida Φ . Modelos dinámicos y de fase: sincronización neuronal como correlato de estados conscientes. Comparación crítica entre teorías: funcionalismo, emergencia y mecanismos neuronales. Percepción, representación y aprendizaje profundo. Redes generativas profundas (VAEs, GANs) como modelos de percepción imaginativa. Atención y conciencia en arquitecturas de IA: transformers y modelos multimodales. Limitaciones del aprendizaje profundo para reproducir la cognición humana. Perspectivas de convergencia: neurociencia teórica y modelos artificiales de conciencia. Perspectivas filosóficas y éticas. Mente, subjetividad y modelado computacional: alcances y límites. ¿Puede un modelo simular la experiencia? Distinción entre correlatos y constituyentes. Neurotecnologías, IA y ética de la conciencia artificial.

PRÁCTICAS

No habrá actividades prácticas, pero sí habrá seminarios de profesores invitados (seis) para contar experiencias de investigación tanto en el campo de la neurociencia computacional como de la neurociencia teórica.

BIBLIOGRAFÍA

1. Sejnowski, T. J. (2020). The Unreasonable Effectiveness of Deep Learning in Artificial Intelligence. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(48), 30033–30038.
2. Abbott, L. F. (2008). Theoretical Neuroscience Rising. *Neuron*, 60(3), 489–495.
3. Dayan, P., & Abbott, L. F. (2001). *Theoretical Neuroscience: Computational and Mathematical Modeling of Neural Systems*. MIT Press.
4. Strogatz, S. H. (2018). *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering (2nd ed.)*. CRC Press.
5. Izhikevich, E. M. (2004). Which Model to Use for Cortical Spiking Neurons? *IEEE Transactions on Neural Networks*, 15(5), 1063–1070.
6. Goodfellow, I., Bengio, Y., and Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press.
7. Nielsen, M. A. (2015). *Neural Networks and Deep Learning*. Determination Press.
8. Seth, A. K. (2021). *Being You: A New Science of Consciousness*. Faber & Faber.
9. Rolls, E. T. (2014). *Emotion and Decision-Making Explained*. Oxford University Press.
10. Pessoa, L. (2022). *The Entangled Brain: How Perception, Cognition, and Emotion Are Woven Together*. MIT Press.

MODALIDAD DE EVALUACIÓN

Los estudiantes deberán aprobar

- Aprobar dos parciales escritos. Cada parcial se evaluará entre cero (0) y diez (10).
- Estudiar, presentar, defender y un trabajo científico (de otros autores) el cual se acordará con el profesor. Esta defensa se evaluará entre cero (0) y diez (10).
- Asistir al menos al 80% de las clases.

REQUERIMIENTOS PARA EL CURSADO

El curso está preparado para un público general, de cualquier carrera de la universidad.