

Matemáticas aplicadas a las geociencias, los sistemas dinámicos y la ciencia de datos

Equipo organizador

- David García García (Universidad de Alicante)
- Lorena Segura Abad (Universidad de Alicante)
- Isabel Vigo Aguiar (Universidad de Alicante)
- Juan Adrián Vargas Alemañy (Universidad de Alicante)

Descripción

El área de Matemática Aplicada de la Universidad de Alicante integra varias líneas de investigación, como son la geodesia espacial, rotación de la tierra, sistemas dinámicos, simulaciones numéricas y ciencia de datos. En esta sesión se dará un amplio recorrido sobre la importancia de las Matemáticas en estas estas temáticas, centrándonos en algunos de los trabajos más recientes de los grupos integrantes.

Palabras clave: geodesia espacial; rotación de la tierra; sistemas dinámicos; simulaciones numéricas; ciencia de datos.

Programa

JUEVES, 22 de enero

- 11:00 – 11:30 Isabel Vigo Aguiar (Universidad de Alicante)
Estimación de las corrientes geostróficas globales con alta resolución espacial derivada de datos de satélite
- 11:30 – 12:00 David García García (Universidad de Alicante)
Estimaciones de los flujos horizontales netos de agua en el océano a partir de GRACE/GRACE-FO y ERA5
- 12:00 – 12:30 Juan A. Vargas Alemañy (Universidad de Alicante)
Uso de Datos Satelitales para el Estudio del Momento Angular del Océano
- 12:30 – 13:00 Ignacio Martínez Caballero (Universidad de Alicante)
*Integración de teoría de redes y dinámica lagrangiana para el estudio de la dispersión de *Aristeus antennatus* (gamba roja) en el Mar Mediterráneo*
- 15:30 – 16:00 José Manuel Ferrándiz (Universidad de Alicante)
Teorías actuales de la rotación terrestre y sus precedentes
- 16:00 – 16:30 Santiago Belda Palazón (Universidad de Alicante)
Rigorous Estimation of terrestrial and celestial references frames and Earth Orientation Parameters from VLBI Observations Using Advanced Mathematical Models
- 16:30 – 17:00 Juan F. Navarro Llinares (Universidad de Alicante)
Escape en el problema fotogravitacional de Copenhague
- 17:00 – 17:30 María del Carmen Martínez Belda (Universidad de Alicante)
Análisis de la geometría del escape en el problema del anillo de $N + 1$ cuerpos

VIERNES, 23 de enero

- 11:00 – 11:30 Alberto Perez Cervera (Universidad de Alicante)
Descripción global de dinámicas oscilatorias a través del Método de la Parametrización
- 11:30 – 12:00 Laura Moreno Martínez (Universidad de Alicante)
Simulación numérica de flujos viscoplásticos mediante formulaciones mixtas con MPM en contextos hidrológicos extremos
- 12:00 – 12:30 Miguel Alejandro Plana Torregrosa (Universidad de Alicante)
Técnicas y análisis de causalidad en el ámbito de la ciencia de datos

Estimación de las corrientes geostróficas globales con alta resolución espacial derivada de datos de satélite

ISABEL VIGO AGUIAR, JUAN A. VARGAS-ALEMAÑY, DAVID GARCÍA GARCÍA

Departamento Matemática Aplicada e Ingeniería Aeroespacial, Universidad de Alicante

vigo@ua.es

Resumen. El océano es un sistema dinámico influenciado por una multitud de fuerzas físicas, entre ellas la gravedad, la fricción, los gradientes de presión y la fuerza de Coriolis. Entre ellas, las corrientes geostróficas (GC, por sus siglas en inglés, igual que los siguientes acrónimos) emergen como un componente crucial de la circulación oceánica, desempeñando un papel fundamental en la configuración del sistema climático de la Tierra. La estimación geodésica de las corrientes geostróficas superficiales es factible mediante datos satelitales. Aprovechando los datos de la altura de la superficie del mar (SSH) obtenidos por altimetría satelital y un geoide independiente derivado de datos de gravedad satelital, en particular del satélite GOCE, es posible determinar la topografía dinámica absoluta (ADT). Utilizando la ADT, se deriva el campo de velocidad de las corrientes geostróficas superficiales (SGC) a través de derivadas parciales a lo largo de la latitud y la longitud. Posteriormente, estas corrientes se propagan hacia abajo, utilizando perfiles de temperatura y salinidad [1, 2]. Este estudio presenta estimaciones de la GC para toda la circulación oceánica global con una resolución espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ de manera uniforme en todas las profundidades. Nuestro análisis abarca la compleja interacción de las corrientes oceánicas en todo el mundo, captando características destacadas como la corriente del Golfo, la corriente circumpolar antártica y la corriente de Kuroshio. La validación de nuestros hallazgos se lleva a cabo mediante la comparación con diversas mediciones in situ en diferentes corrientes y regiones de estrangulamiento, incluidos el paso de Drake y el estrecho de Gibraltar. En resumen, nuestra investigación ofrece información valiosa para la estimación de las corrientes geostróficas globales utilizando datos obtenidos por satélite, lo que arroja luz sobre los procesos dinámicos que rigen la circulación oceánica.

Referencias

- [1] I. Vigo, D. García-García, M. D. Sempere, B. F. Chao, 3D (2018). Geostrophy and Volume Transport in the Southern Ocean. *Remote Sensing* 10, 715, 1–18, doi: 10.3390/rs10050715.
- [2] J. A. Vargas-Alemañy, M. I. Vigo, D. García-García, Z. Ferdous (2023). Updated geostrophic circulation and volume transport from satellite data in the Southern Ocean. *Front. Earth Sci.* 11:1110138. doi: 10.3389/feart.2023.1110138.

Agradecimientos. Proyecto parcialmente financiado por un proyecto nacional (PID2021-122142OB-I00 financiados por MCIN/AEI/10.13039/501100011033) y otro de la Generalitat Valenciana (PROMETEO/2021/030).

Estimaciones de los flujos horizontales netos de agua en el océano a partir de GRACE/GRACE-FO y ERA5

DAVID GARCÍA GARCÍA, KAMEL BOULAHIA, MARIO TROTTINI, JUAN A. VARGAS-ALEMAÑY,
JUAN-MANUEL SAYOL, ISABEL VIGO

Departamento Matemática Aplicada e Ingeniería Aeroespacial, Universidad de Alicante

d.garcia@ua.es

Resumen. En el océano, los flujos horizontales de agua pueden estimarse a partir de diversas mediciones in situ y modelos de circulación general oceánica. Sin embargo, el estudio de dichos flujos mediante mediciones remotas ha sido muy complicado durante décadas. En los últimos años, se ha desarrollado una técnica que permite calcular los transportes netos de agua oceánica entre cuencas a partir de: (1) mediciones temporales de gravedad realizadas por las misiones GRACE y GRACE-FO; (2) precipitaciones y evaporaciones globales, como las del modelo de reanálisis atmosférico ERA5. En este trabajo, mostramos una recopilación de los resultados obtenidos con esta técnica, como el intercambio neto de agua entre cuencas oceánicas [1] y entre mares semicerrados (mares Negro, Mediterráneo [2] y Báltico [3], y el golfo Árabe [4]) y el océano abierto. Estos resultados son útiles para comprender la dinámica oceánica y proporcionar restricciones para los modelos oceánicos numéricos.

Referencias

- [1] D. García-García, I. Vigo, M. Trottini (2020). Water transport among the world ocean basins within the water cycle. *Earth Syst. Dynam.* 11, 1089–1106. <https://doi.org/10.5194/esd-11-1089-2020>, 2020.
- [2] D. García-García, I. Vigo, M. Trottini (2022). Hydrological cycle of the Mediterranean-Black Sea system. *Climate Dynamics* 59, 1919–1938. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06188-2>.
- [3] A. K. Boulahia, D. García-García, M. Trottini, J.-M. Sayol, M. I. Vigo. (2022). The water cycle of the Baltic Sea region from GRACE/GRACE-FO missions and ERA5 data. *Front. Earth Sci.* 10:879148, 1–13. doi: 10.3389/feart.2022.879148.
- [4] A. K. Boulahia, D. García-García, M. Trottini, J.-M. Sayol, M. I. Vigo. (2024). Hydrological Cycle in the Arabian Sea Region from GRACE/GRACE-FO Missions and ERA5 Data. *Remote Sens.* 16, 3577. <https://doi.org/10.3390/rs16193577>. 2024

Agradecimientos. Proyecto parcialmente financiado por proyectos nacionales (RTI2018-093874-B-100 y PID2021-122142OB-I00 financiados por MCIN/AEI/10.13039/501100011033), de la Generalitat Valenciana (PROMETEO/2021/030) y Generalitat Valenciana y Fondo Social Europeo (APOSTD/2020/254).

Uso de Datos Satelitales para el Estudio del Momento Angular del Océano

JUAN A. VARGAS-ALEMAÑY, ISABEL VIGO AGUIAR, DAVID GARCÍA GARCÍA, JOSÉ MANUEL FERRÁNDIZ
LEAL, MARIO TROTTINI

Departamento Matemática Aplicada e Ingeniería Aeroespacial, Universidad de Alicante

juan.vargas@ua.es

Resumen. El momento angular del océano (OAM, por sus siglas en inglés) experimenta variaciones debido tanto a los cambios en la distribución de la masa oceánica como a las modificaciones en la dirección y velocidad de las corrientes marinas. Comprender estas variaciones es de gran relevancia, ya que el OAM influye en varios componentes del sistema Tierra, incluida la rotación del planeta. Si bien existen diversos productos que estiman estos cambios, todos ellos se basan en modelos globales de circulación oceánica. Una alternativa a los modelos es el uso de observaciones satelitales para estimar las corrientes geostróficas (GC, por sus siglas en inglés), que representan una parte dominante de la circulación oceánica global. Estas corrientes surgen del equilibrio entre la fuerza de Coriolis y el gradiente de presión, y pueden ser estimadas utilizando datos geodésicos obtenidos por misiones satelitales. Al combinar información de altura de la superficie del mar (SSH) proveniente de altimetría satelital, un geoide independiente derivado de datos de gravedad por satélite es posible calcular las GC. A partir de las corrientes superficiales así estimadas, se pueden derivar perfiles de GC a distintas profundidades utilizando distribuciones verticales de temperatura y salinidad. Estas estimaciones de GC basadas en datos satelitales permiten calcular el OAM de forma independiente de los modelos. El OAM derivado de este enfoque se compara con otros productos existentes, y se anticipa que ofrezca estimaciones más fiables, dado que las GC obtenidas por satélite presentan una mejor concordancia con las mediciones in situ que aquellas generadas mediante modelos.

Integración de teoría de redes y dinámica lagrangiana para el estudio de la dispersión de *Aristeus antennatus* (gamba roja) en el Mar Mediterráneo

IGNACIO MARTÍNEZ CABALLERO, JUAN MANUEL SAYOL, DAVID GARCÍA, MARIO TROTTINI, CÉSAR BORDEHORE, ISABEL VIGO

Departamento Matemática Aplicada e Ingeniería Aeroespacial, Universidad de Alicante

ignacio.martinezcaballero@ua.es

Resumen. En los últimos años la captura mediante pesca de arrastre de *Aristeus antennatus* (gamba roja) muestra un declive en los alrededores del canal de Ibiza. En este estudio se combina la aplicación de la teoría de redes con simulaciones lagrangianas con la intención de ayudar a mitigar este declive mediante la simulación de diferentes escenarios de protección de poblaciones. Así, a partir de campos de corrientes oceánicas de alta resolución espacial provenientes de un modelo numérico, y datos biológicos de *Aristeus antennatus*, se ha simulado la dispersión en toda la columna de agua durante las fases larvales mediante una aproximación lagrangiana. A continuación, las posiciones finales simuladas se usan para estudiar su conectividad espacial, y las zonas potenciales de retención y dispersión.

Agradecimientos. Este estudio forma parte del Programa ThinkInAzul y ha sido parcialmente financiado por la Generalitat Valenciana (GVA-THINKINAZUL/2021/035); cuyos investigadores principales son Isabel Vigo y César Bordehore. Además, este trabajo ha sido parcialmente financiado por el programa de investigación e innovación Horizonte Europa de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención n.º Proyecto: 101212647 — SEA4FUTURE — HORIZON-MISS-2024-OCEAN-01. (No obstante, las opiniones y puntos de vista expresados son exclusivamente los de los autores y no reflejan necesariamente los de la Unión Europea ni los de Universidad de Alicante. Ni la Unión Europea ni la autoridad que concede la subvención se hacen responsables de ellos).

Teorías actuales de la rotación terrestre y sus precedentes

JOSÉ MANUEL FERRÁNDIZ, , ALBERTO ESCAPA, SANTIAGO BELDA, MARIA KARBON

Departamento Matemática Aplicada e Ingeniería Aeroespacial, Universidad de Alicante

jm.ferrandiz@ua.es

Resumen. Desde tiempos inmemoriales la humanidad ha necesitado conocer su entorno próximo y lejano. Por ejemplo, el movimiento de la Tierra en el espacio, tanto su rotación como su traslación u órbita, era útil para predecir los cambios de las estaciones y la longitud del día, o para predecir los eclipses junto con el movimiento de la Luna. Sabemos que los babilonios habían descubierto el periodo de saros y que grandes pensadores griegos de los siglos III y II a.C., como Eratóstenes e Hiparco, fueron capaces de determinar con bastante precisión la oblicuidad de la eclíptica, el radio de la Tierra o la distancia al Sol, usaban la latitud y la longitud para el posicionamiento sobre la superficie esférica e incluso pusieron los fundamentos de la futura trigonometría o el cálculo infinitesimal, aunque gran parte de sus trabajos se han perdido y se conocen por referencias. Pero es a partir de Newton y Euler cuando los métodos necesarios para estudiar las órbitas y la rotación de los cuerpos celestes, en particular la Tierra y la Luna, empiezan a desarrollarse de forma espectacular, surgiendo una multitud de conceptos teóricos y métodos prácticos en los que se puede seguir profundizando aunque a veces no se conozca su origen. En el siglo XX se impusieron los métodos variacionales, siendo el lagrangiano reemplazado por el hamiltoniano asociado con los métodos de perturbaciones ayudados con cálculo simbólico. En esta presentación nos centraremos en ofrecer una selección de los elementos de las teorías actuales, que combinan herramientas analíticas con métodos computacionales para llegar a obtener soluciones que están ya muy cerca de lograr la altísima precisión impuesta por la observación de las variaciones del nivel del mar, es decir, un milímetro.

Agradecimientos. Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Generalitat Valenciana (SEJIGENT/2021/001), la Unión Europea-NextGenerationEU (ZAMBRANO 21-04) y por el proyecto español PID2020-119383GB-I00 financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (MCIN/AEI/10.13039/501100011033/).

Rigorous Estimation of terrestrial and celestial references frames and Earth Orientation Parameters from VLBI Observations Using Advanced Mathematical Models

SANTIAGO BELDA, MARIA KARBON, ALBERTO ESCAPA, JOSÉ MANUEL FERRÁNDIZ

Departamento Matemática Aplicada e Ingeniería Aeroespacial, Universidad de Alicante

santiago.belda@ua.es

Resumen. At the University of Alicante, we are conducting a comprehensive analysis of Very Long Baseline Interferometry (VLBI) data with the aim of improving the estimation of the Terrestrial Reference Frame (TRF), the Celestial Reference Frame (CRF), and Earth Orientation Parameters (EOP). Our approach is grounded in advanced theoretical frameworks and rigorous mathematical methodologies to dynamically model and estimate these geodetic and astrometric parameters, allowing for a robust treatment of temporal correlations and stochastic processes. The methodology integrates state-of-the-art models for precession-nutation, station motion, and signal propagation, ensuring consistency with IERS conventions while exploring refinements based on recent geophysical insights. Special attention is given to the analysis and prediction of Free Core Nutation (FCN) and Celestial Pole Offsets (CPO), where high-precision VLBI data allow us to test theoretical predictions against empirical time series. This contribution highlights the interplay between mathematical modelling and geodetic analysis, showing how rigorous estimation strategies can yield significant advances in global reference frames and Earth system science. Our work supports not only fundamental geodesy but also applications in space navigation, Earth observation, and astronomy.

Agradecimientos. This work was partially supported by Generalitat Valenciana (SEJIGENT/2021/001, PROMETEO/2021/030), the European Union-NextGenerationEU (ZAMBRANO 21-04) and by Spanish Project PID2020-119383GB-I00 funded by Ministerio de Ciencia e Innovación (MCIN/AEI/10.13039/501100011033/).

Escape en el problema fotogravitacional de Copenhague

JUAN F. NAVARRO LLINARES

Departamento Matemática Aplicada e Ingeniería Aeroespacial, Universidad de Alicante

jf.navarro@ua.es

Resumen. El problema de Copenhague es un caso particular del problema plano restringido de tres cuerpos en el que los dos primarios masivos tienen la misma masa. Este problema ha vuelto a atraer la atención de la comunidad científica debido al descubrimiento reciente de cientos de sistemas extrasolares compuestos por pocos cuerpos. Algunos de estos sistemas son sistemas binarios de estrellas, y otros están formados por una estrella y un planeta de masas parecidas en rotación en torno a su centro de masas. En este trabajo, consideramos que uno de los dos cuerpos es una fuente de radiación y estudiamos el modo en que su factor de reducción afecta a la geometría de las cuencas de escape del sistema.

Análisis de la geometría del escape en el problema del anillo de $N + 1$ cuerpos

M. CARMEN MARTÍNEZ BELDA, ZAHRA BOUREGHDA, JUAN F. NAVARRO LLINARES

Departamento Matemática Aplicada e Ingeniería Aeroespacial, Universidad de Alicante

carmen.martinez@ua.es

Resumen. La dinámica de múltiples cuerpos es clave para el estudio de sistemas exoplanetarios, anillos planetarios y misiones espaciales. En este contexto, el problema del anillo de $N + 1$ cuerpos es un modelo instructivo para explorar sistemas celestes. Éste consiste en el estudio del movimiento de una partícula de masa despreciable bajo la influencia gravitatoria de $N + 1$ cuerpos, de forma que N de ellos, de idéntica masa, m , están dispuestos en los vértices de un polígono regular y están girando alrededor de otro cuerpo, de masa m_0 , que se sitúa en el centro de la configuración. La dinámica de la geometría de escape en este sistema depende de tres parámetros: el número de cuerpos periféricos, N , la razón de masas, $\beta = m_0/m$ y la integral primera conocida del sistema, C , llamada constante de Jacobi. En este trabajo, hacemos una revisión de los últimos hallazgos en el análisis de la geometría de las curvas de velocidad cero, las cuencas de escape y la probabilidad de escape en función de N , β y C .

Descripción global de dinámicas oscilatorias a través del Método de la Parametrización

ALBERTO PÉREZ-CERVERA, TERE M. SEARA Y GEMMA HUGUET

Departamento Matemática Aplicada e Ingeniería Aeroespacial, Universidad de Alicante

alberto.perezc@ua.es

Resumen. La técnica de reducción de fase es un método ampliamente utilizado para estudiar de forma simple dinámicas oscilatorias. Esta técnica ha dado lugar, a través de las conocidas como Curvas de Respuesta de Fase, a un fructífero método de análisis tanto de osciladores acoplados como de respuesta a perturbaciones. Sin embargo, el dominio de aplicación de estas técnicas se ve restringido a perturbaciones o acoplamiento débil debido a que asume que las trayectorias están sobre el ciclo límite. En este trabajo proporcionamos una metodología basada en el método de la parametrización que permite extender estas técnicas a la variedad invariante del ciclo límite. El método de la parametrización proporciona, mediante algoritmos eficientes, una parametrización de la variedad invariante del ciclo límite en términos de las variables fase-amplitud. El método tiene varias ventajas. Proporciona analíticamente una expansión de Fourier-Taylor de la parametrización hasta cualquier orden, así como una simplificación de la dinámica, facilitando así la globalización numérica de las variedades. De esta forma, se puede obtener un retrato geométrico de la dinámica oscilatoria a través de las isocronas e isoestables locales y globales. Además, nuestro método proporciona directamente las funciones infinitesimales de respuesta de fase y amplitud, las cuales controlan los desplazamientos de fase y amplitud más allá del estado asintótico. De esta forma, la metodología presentada arroja una descripción precisa de la dinámica de fase para perturbaciones no restringidas al ciclo límite, sino a su variedad invariante de atracción. Finalmente, exploramos algunas estrategias para reducir la dimensión de la dinámica, incluyendo la reducción de la dinámica a la variedad estable lenta. Ilustramos nuestros métodos aplicándolos a diferentes modelos tridimensionales de neurona única y de población neuronal en neurociencia.

Simulación numérica de flujos viscoplásticos mediante formulaciones mixtas con MPM en contextos hidrológicos extremos

Laura Moreno Martínez, Antonia Larese, Roland Wuechner

Departamento Matemática Aplicada e Ingeniería Aeroespacial, Universidad de Alicante

laura.morenomartinez@ua.es

Resumen. La modelización y simulación numérica de fenómenos naturales extremos, como deslizamientos de tierra que impactan sobre cuerpos de agua, oleajes inducidos por movimientos rápidos del terreno, procesos hidrodinámicos en el océano o interacciones de flujos con estructuras en entornos montañosos, costeros u oceánicos, es fundamental para comprender su dinámica y desarrollar herramientas predictivas robustas. En estos escenarios, la simulación de flujos viscoplásticos resulta especialmente desafiante desde el punto de vista matemático y computacional, debido a la coexistencia de materiales con comportamientos distintos (como flujos granulares y fluidos), las grandes deformaciones y la presencia de superficies libres. En este trabajo se propone una formulación mixta estabilizada para el Material Point Method (MPM) en su versión implícita, diseñada específicamente para simular este tipo de fenómenos. El MPM puede entenderse como un método de elementos finitos enriquecido, donde la discretización del dominio combina una malla de referencia con partículas que transportan las variables de estado. Esta característica lo hace especialmente adecuado para tratar problemas con grandes desplazamientos, cambios topológicos y simulaciones hidrodinámicas en dominios complejos. La formulación propuesta está inspirada en enfoques clásicos de la mecánica de sólidos no lineal y permite modelizar tanto comportamientos sólidos como fluidos mediante la elección adecuada de la ley constitutiva. En particular, el marco desarrollado es aplicable a la simulación de flujos incompresibles como el agua, lo que abre la puerta a su uso en la modelización de la circulación oceánica y oleaje a alta resolución. En este contexto, las formulaciones basadas únicamente en el desplazamiento se vuelven inestables debido a la violación de la condición inf-sup. Para evitar este problema, se introduce una formulación mixta desplazamiento-presión, estabilizada mediante un enfoque de multiescala variacional (VMS), que garantiza estabilidad numérica y precisión en el campo de presiones. Se presentan distintos ejemplos numéricos que validan la metodología y ponen de manifiesto su robustez frente a problemas computacionalmente exigentes.

Agradecimientos. This work was supported by the European Union's Horizon Europe research and innovation programme under grant agreement No Project: 101212647 — SEA4FUTURE — HORIZON- MISS-2024-OCEAN-01. (Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or Universidad de Alicante. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them).

Técnicas y análisis de causalidad en el ámbito de la ciencia de datos

MIGUEL ALEJANDRO PLANA TORREGROSA, KRISTIAN ALONSO STENBERG, LORENA SEGURA ABAD, JOSUÉ ANTONIO NESCOLARDE SELVA, MIGUEL LLORET CLIMENT

Departamento Matemática Aplicada e Ingeniería Aeroespacial, Universidad de Alicante

mapt3@gcloud.ua.es

Resumen. En el contexto actual de la ciencia de datos, la inferencia causal ha cobrado una relevancia creciente como herramienta para interpretar y explicar fenómenos más allá de la mera correlación estadística. A diferencia de los enfoques descriptivos o predictivos tradicionales, el análisis causal permite responder a preguntas del tipo “¿qué pasaría si...?”, proporcionando un marco más sólido para la toma de decisiones basada en datos. Esta ponencia tiene como objetivo principal ofrecer una introducción matemática rigurosa, clara y accesible a los fundamentos teóricos y prácticos de la causalidad en ciencia de datos, que se ha implementado en lenguajes como R y Python, con especial atención a su aplicabilidad en contextos reales, en particular, al mercado inmobiliario español. En esta ponencia no se persigue únicamente acercarse a la teoría matemática del análisis causal, sino mostrar también su valor añadido en la construcción de modelos más interpretables, accionables y socialmente responsables en el ámbito de la ciencia de datos.

Referencias

- [1] J. Pearl, D. Mackenzie (2020) *The book of why: The new science of cause and effect*. New York: Basic books..
- [2] C. W. Granger (1969). Investigating causal relations by econometric models and cross- spectral methods. *Econometrica* 37 (3), 424.
- [3] K. H. Brodersen, F. Gallusser, J. Koehler, N. Remy, S. L. Scott (2015). Inferring causal impact using bayesian structural time-series models. *The Annals of Applied Statistics*, 9(1).
- [4] K. Alonso-Stenberg (2020). *Diseño e implementación de un simulador de análisis causal*. Tesis doctoral, Universidad de Alicante, España.