

CoCo 2025: Cosmology in Colombia

Thursday 13 November 2025 - Friday 14 November 2025

Ciudad Universitaria Meléndez



Book of Abstracts

Contents

Testing the Quasi-Static and Sub-Horizon Approximations in Horndesky Theories. . . .	1
Jacobson's thermodynamic approach to classical gravity applied to non-Riemmanian geometries: remarks on the simplicity of nature	1
Can we link galaxy assembly times to the assembly times of their host halos?: A perspective from Mutual Information II	1
Gravitoelectromagnetismo - movimiento de una partícula con espín en relatividad general.	2
Viscous universe models and the Hubble tension	2
Modelos cosmológicos basados en entropías generalizadas en el horizonte aparente del universo	3
Hiperbolicity and Stability in the generalized Proca SU(2) theory	3
Testing cosmic anisotropy and modified gravity	4
IDENTIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS EN EL UNIVERSO A TRAVÉS DEL CLUSTERING DE CUÁSARES	4
OPTIMIZATION OF THE SCHRÖDINGER-POISSON MODEL USING B-SPLINES	4
Tracing the Imprint of the Cosmic Web and Tidal Anisotropy on Halo Assembly	5
Exploiting the cosmic web in DESI for enhanced cosmological constraints	5
Interplay between Spatial Curvature and Multifield Dynamics in Exponential Quintessence	6
EFFECTOS SISTEMÁTICOS SOBRE LA ESTIMACIÓN DE H_0 CON ONDAS GRAVITACIONALES	7
Simulated LAE galaxies during Reionization	8
Analytical Description of Baryonic Matter Fluctuations Using Jeans Filtering Functions in Second-Order Cosmological Perturbation Theory	8
ASTRA: clasificación cosmológica de la red cósmica	9
Cosmología de la red cósmica con DESI: Análisis de EDR y DR1	9

Vacíos y filamentos en la red cósmica a partir de datos de DESI: Funciones de tamaño como pruebas cosmológicas	10
Afectación de la masa de las estrellas de neutrones por acoplamiento con el Axión en gravedad modificada	11
From Entropy to Geometry	11
Quality control and strong lens discovery in DESI: an artificial intelligence approach to cosmological spectroscopic surveys	12
Multiwavelength Luminosity Correlations in Quasars and Their Potential as Standard Candles	13
Cosmología de la red cósmica con DESI: Análisis de EDR y DR1	13
Curvas de rotación como pruebas a gravedad modificada.	14

26

Testing the Quasi-Static and Sub-Horizon Approximations in Horndesky Theories.

Authors: SANTIAGO GARCIA SERNA^{None}; JOHN BAYRON ORJUELA-QUINTANA¹; Cesar A. Valenzuela-Toledo²

¹ UNIVERSIDAD DEL VALLE

² Departamento de Física, Universidad del Valle

Corresponding Authors: santiago.serna@correounivalle.edu.co, cesar.valenzuela@correounivalle.edu.co, john.orjuela@correounivalle.edu.co

In the framework of Horndesky theories, we evaluate the validity and consistency of the Quasi-Static and Sub-Horizon Approximations (QSA-SHA) in the study of cosmological perturbations. By applying these approximations, we determine the corresponding gravitational potentials and compare them with the results obtained from standard perturbative treatments. This analysis allows us to identify the leading 0 order $\mathcal{O}(0)$ terms that dominate the dynamics on large scales, providing the necessary conditions for accurate numerical integrations within modified gravity scenarios.

28

Jacobson's thermodynamic approach to classical gravity applied to non-Riemmanian geometries: remarks on the simplicity of nature

Author: Jhan Nicolás Martínez Lobo¹

Co-authors: Jose Fernando Rodriguez Ruiz¹; Yeinzon Rodríguez García

¹ Universidad Industrial de Santander

Corresponding Authors: yeinzon.rodriguez@uan.edu.co, jhanmartinez_15@hotmail.com, joferoru@gmail.com

Three decades ago, Ted Jacobson surprised us with a very appealing approach to General Relativity. According to his proposal, the gravitational field equations are the consequence of the first law of thermodynamics applied to a Rindler observer. Together with the dynamical laws of the black holes, Jacobson's approach has become a very strong piece of evidence supporting the intimate connection between gravity, thermodynamics, and quantum theory. By the time, advances in this direction have been, nevertheless, somewhat scarce. Jacobson's approach being formulated for Riemmanian geometries, we have wondered what its consequences would be for non-Riemmanian geometries, i.e., those that involve both torsion and non metricity. The results of our quest have been particularly appealing: we have found that, in an arbitrary number of dimensions, the Einstein-Hilbert action remains as one of the possibilities that nature could have selected in agreement with Jacobson's proposal (the only one, indeed, for Riemmanian geometries). There exist other "more complex" possibilities if either torsion or non metricity or both are involved. In the search of a unique alternative, we have been led towards an analysis of additional requirements like, for instance, one or some of the set employed in the formulation of the Lanczos-Lovelock theories of gravity.

31

Can we link galaxy assembly times to the assembly times of their host halos?: A perspective from Mutual Information II

Author: Yeimy Dallana Camargo Camargo¹

Co-author: Rigoberto Angel Casas Miranda ¹

¹ *Universidad Nacional de Colombia*

Corresponding Authors: ydcamargoc@unal.edu.co, racasasm@unal.edu.co

Building upon our previous analysis, which explored the connection between the assembly histories of galaxies and their host dark matter haloes using galaxies with stellar masses in the range $10^9 \leq M_\star [h^{-1} M_\odot] \leq 10^{11.5}$ from the Next Generation Illustris simulations (IllustrisTNG), our study employed the Mutual Information (MI) statistic to quantify the degree of dependence between the galaxy assembly time (z_G) and various halo and galaxy properties. We found that the MI between z_G and the halo assembly time (z_H) is moderate for galaxies with $M_\star \lesssim 10^{10.25} h^{-1} M_\odot$, decreasing towards higher stellar masses. In the present work, we extend this framework to include the galaxy formation efficiency ($F_\star$) and a set of cluster observables: the magnitude gap, satellite richness, and the projected distances to the second and fourth most massive (or luminous) satellites. For galaxy properties, we find a strong correlation between $F_\star$ and z_H in low-mass central galaxies, suggesting a co-evolutionary link between stellar growth and halo assembly. In contrast, cluster observables show weaker overall correlations with halo formation time, although satellite richness systematically increases with stellar mass. This trend implies that richness becomes a more effective tracer of formation history in massive haloes, where satellite accretion dominates their late-time growth.

33

Gravitoelectromagnetismo - movimiento de una partícula con espín en relatividad general.

Authors: Yesid Fernando Guerrero Guio¹; Juan Manuel Tejeiro Sarmiento¹

¹ *Universidad Nacional de Colombia*

Corresponding Authors: yeguerrero@unal.edu.co, jmtejiros@unal.edu.co

Aun cuando la estructura e interpretación de las teorías de gravedad y electromagnetismo son muy diferentes, desde un principio, la ley de gravitación de Newton y la ley de Coulomb motivaron la investigación de analogías entre ambas teorías. Si bien se lograron algunos avances en la gravedad Newtoniana, fue en el marco de la relatividad general donde Einstein, Lense y Thirring exploraron una analogía formal a partir de la aproximación de campo débil. En esta aproximación, una corriente de masa, es decir un cuerpo en rotación, genera un campo gravitomagnético análogo a como sucede en el electromagnetismo. Además, mediante esta analogía se puede explicar el efecto de Lense-Thirring y el efecto de reloj gravitomagnético. También se pueden encontrar analogías que extienden su validez a campos fuertes. En este trabajo se presentará la analogía con base en las fuerzas inerciales, que surge debido a las propiedades cinemáticas de una congruencia de observadores acelerados, y con base en los tensores de marea, los cuales se construyen a partir del desarrollo y comparación de las ecuaciones de desvío geodésico de la línea de mundo, en ambas teorías. Estas analogías permiten caracterizar y entender el movimiento de partículas de prueba con momento angular (espín) a través de las ecuaciones de Mathisson Papapetrou Dixon, así como algunas aplicaciones cosmológicas y astrofísicas involucradas.

34

Viscous universe models and the Hubble tension

Authors: David Ricardo Moreno Diaz¹; JOHN BAYRON ORJUELA-QUINTANA²; Yeinzon Rodríguez García^{None}

¹ *Universidad Industrial de Santander*

² UNIVERSIDAD DEL VALLE

Corresponding Authors: ricardo_moreno75@outlook.com, john.orjuela@correounivalle.edu.co, yeinzon.rodriguez@uan.edu.co

The Λ CDM model is well known and widely accepted in cosmology because of its capability to effectively describe the observed phenomena at large scales. Examples of this is the explanation of the accelerated expansion and the abundance of the primordial light elements. However, with the improvement of astronomical data, a significant tension for the current Hubble parameter has been consolidating. This tension, which is nowadays around 5σ , raises when comparing the data obtained from SH0ES, in the local universe, and the data from PLANCK, in the cosmic microwave background, the latter being based on the Λ CDM model. Having in mind the possible dismissal of the Hubble tension as due to systematic errors, it is plausible to follow a line of research in the search of new cosmological models that replace the current paradigm. In the search for the solution to this tension, diverse cosmological models have been proposed in the latest years; among these, the viscous cosmological model that describes the dark matter as a viscous fluid. The purpose of this work is to study a pair of phenomenologically-distinct viscous universe models and evaluate if they can ameliorate the Hubble tension. To this end, computational tools like CLASS and MontePython will be used to infer the different free parameters that characterize the models; the latter is possible thanks to a Bayesian statistical analysis in the light of the observations from supernovas and the cosmic microwave background.

35

Modelos cosmológicos basados en entropías generalizadas en el horizonte aparente del universo

Author: PEDRO MARTIN IBARBO PERLAZA¹

¹ Universidad del Valle

Corresponding Author: pedro.ibarbo@correounivalle.edu.co

En los últimos años ha surgido una nueva perspectiva para estudiar la evolución del universo, conocida como la conjetura de la gravedad termodinámica. En este trabajo se analiza cómo la primera ley de la termodinámica, aplicada al horizonte aparente del universo, permite derivar ecuaciones de Friedmann modificadas a partir de distintas formulaciones de la entropía del horizonte, en particular las entropías de Tsallis, Barrow y Kaniadakis. Asimismo, se determina el rango de validez de los parámetros entrópicos que aseguran una cosmología físicamente viable, a partir del parámetro de desaceleración. Finalmente, se presentan los resultados para el parámetro de desaceleración, la evolución de las densidades de energía y la ecuación de estado, evidenciando cómo estas entropías generalizadas pueden describir las diferentes etapas de la evolución cósmica.

36

Hiperbolicity and Stability in the generalized Proca SU(2) theory

Authors: Gabriel Gomez¹; Jose Fernando Rodriguez Ruiz²

¹ Universidad de Santiago de Chile

² Universidad Industrial de Santander

Corresponding Authors: joferoru@gmail.com, gabrielphysics@gmail.com

We study the well-posed 1+1 evolution of self-interacting SU(2) vector fields minimally coupled to gravity within the framework of the 't Hooft-Polyakov magnetic monopole configuration in an astrophysical context. We found a counterexample in which self-interacting vector fields retain a

well-posed initial value problem formulation. Also the stability of the black hole solution with non abelian charge is addressed.

41

Testing cosmic anisotropy and modified gravity

Author: JOSE LUIS PALACIOS CORDOBA¹

¹ *Universidad Del Valle*

Corresponding Author: palacios.jose@correounivalle.edu.co

This talk presents a summary of ongoing research projects developed in collaboration with professors from Universidad del Valle and other institutions. These works explore the cosmological implications of extended gravity and dark energy models across different dynamical regimes—from the background level to linear perturbations and nonlinear N-body simulations. Specifically, we study: (i) the physical validity of the conformal equivalence between $f(R)$ and scalar field theories; (ii) the dynamics of Moving Horndeski (KGB) models with relative velocities between fluids, inducing Bianchi-I anisotropies; and (iii) cosmological constraints on anisotropic dark energy models. The overall goal is to test possible deviations from the standard Λ CDM cosmology.

40

IDENTIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS EN EL UNIVERSO A TRAVÉS DEL CLUSTERING DE CUÁSARES

Authors: Diana Carolina Zapata Zuluaga¹; Juan Carlos Muñoz Cuartas¹

¹ *Universidad de Antioquia*

Corresponding Authors: juan.munozc@udea.edu.co, dianac.zapata@udea.edu.co

En este trabajo se utiliza el catálogo *Quia*, una de las muestras más limpias y completas de cuásares disponibles hasta la fecha, para estudiar la estructura a gran escala del universo en el entorno de la Vía Láctea. Se trabajó con dos subconjuntos limitados por magnitud ($G < 20.5$ y $G < 20.0$), aplicando procedimientos de limpieza sobre el corrimiento al rojo para mitigar la presencia de valores anómalos y otros outliers. A partir de estas muestras depuradas se construyeron versiones limitadas por volumen, con el fin de asegurar homogeneidad y robustez estadística en los análisis.

Para estudiar el clustering, se estimaron funciones de correlación y, a partir de ellas, se implementó un método basado en halos para reconstruir el campo de densidad subyacente. Este análisis se complementó con un matching con halos provenientes de simulaciones cosmológicas del proyecto IllustrisTNG.

Entre los resultados se encuentran: (1) la caracterización de la distribución de colores de los cuásares en ambas muestras; (2) el análisis de la evolución de su función de luminosidad en función del redshift; (3) el estudio de la función de correlación en espacio de redshift, que revela un clustering dominado por el término a dos halos, con poca contribución del término a un halo; y (4) la reconstrucción del campo de densidad y el análisis topológico de la distribución de masa, con identificación de filamentos y nodos en la red cósmica.

39

OPTIMIZATION OF THE SCHRÖDINGER-POISSON MODEL USING B-SPLINES

Author: Jeison Stiven Lenis Trujillo¹

Co-authors: Cesar A. Valenzuela-Toledo²; Guillermo Javier Madroñero Pabón¹; JOHN BAYRON ORJUELA-QUINTANA³

¹ *Universidad del Valle*

² *Departamento de Física, Universidad del Valle*

³ *UNIVERSIDAD DEL VALLE*

Corresponding Authors: javier.madronero@correounivalle.edu.co, john.orjuela@correounivalle.edu.co, cesar.valenzuela@correounivalle.edu.co, jeison.lenis@correounivalle.edu.co

Large-scale structures in the universe can be studied through N bodies interacting gravitationally. In this work, we approximate this process using a quantum dust fluid in one spatial dimension, described by the **Schrödinger-Poisson equations**. The temporal evolution of the system is calculated using B-splines within the Crank-Nicolson propagator implemented in a predictor-corrector scheme. We analyze different cosmological models and obtain the power spectrum of matter. For future improvements, we aim to reduce the calculation time and incorporate parameters that more accurately reproduce observational results.

32

Tracing the Imprint of the Cosmic Web and Tidal Anisotropy on Halo Assembly

Author: Yeimy Dallana Camargo Camargo¹

Co-author: Rigoberto Angel Casas Miranda¹

¹ *Universidad Nacional de Colombia*

Corresponding Authors: racasasm@unal.edu.co, ydcamargoc@unal.edu.co

In the Λ CDM framework, the Universe appears homogeneous and isotropic on large scales. However, on scales below $\sim 100 Mpc$, the matter distribution reveals a hierarchical pattern known as the cosmic web—an interconnected filamentary network that naturally emerges from the anisotropic gravitational collapse of the density field, driven by tidal forces that induce directional deformations. Using the Next Generation Illustris (IllustrisTNG300-1) simulation, we investigate how the cosmic web and the local tidal environment regulate halo assembly through the tidal anisotropy parameter α_R , which quantifies the directional deformation of the gravitational field at the scale of dark matter haloes with masses in the range $10^{11} \leq M_h [h^{-1} M_\odot] \leq 10^{14.1}$. Our results reveal a strong dependence between halo formation time (z_H) and local tidal anisotropy. Low-mass haloes in highly anisotropic regions—typically associated with filaments—assemble earlier and show lower satellite richness, whereas haloes in more isotropic environments assemble later and host richer satellite systems. By combining α_R with the relative bias b_r , we find that low-mass haloes with early assembly times are preferentially located in regions of highest clustering and high α_R , highlighting the environmental origin of assembly bias. Meanwhile, the morphological environment type of the cosmic web shows no additional dependence on z_H once the halo mass is controlled. These findings suggest that α_R acts as both a driver and a regulator of structure growth, establishing a physical link between halo assembly, clustering strength, and the morphology of the cosmic web.

47

Exploiting the cosmic web in DESI for enhanced cosmological constraints

Author: Valeria Torres-Gomez¹

Co-authors: Diana Carolina Zapata Zuluaga²; Jaime E. Forero-Romero¹; Juliana Hernández-Hernández¹; Sofía Guevara-Montoya³

¹ *Universidad de los Andes*

² *Universidad de Antioquia*

³ *Universidad Nacional de Colombia*

Corresponding Authors: v.torresg23@uniandes.edu.co, dianac.zapata@udea.edu.co, je.forero@uniandes.edu.co, juli.hernandez0109@gmail.com, soguevaram@unal.edu.co

Modern spectroscopic surveys operate at a scale where cosmological inference benefits from both statistical precision and wide coverage. The Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) is mapping the large-scale structure of the Universe through high-throughput multi-object spectroscopy, assembling tens of millions of galaxy and quasar spectra across a redshift range from $z \sim 0$ to $z \sim 3.5$ over $14,000 \text{ deg}^2$. While baryon acoustic oscillations (BAO) and redshift-space distortions (RSD) from two-point correlation functions remain central pillars for constraining the expansion history $H(z)$ and growth rate $f\sigma_8(z)$, DESI's unprecedented depth, volume ($\sim 20 \text{ Gpc}^3$), and target diversity enable complementary analyses that access non-Gaussian information in the matter distribution.

I will show how perspectives sensitive to the cosmic web, characterizing voids, filaments, and their topological organization, naturally complement power spectrum and correlation function summaries. These approaches capture environment-dependent clustering, probe the full probability distribution function of density fluctuations beyond Gaussian predictions, and provide independent constraints on survey systematics such as target selection effects and observational incompleteness.

Specifically, I will outline how cosmic-web-based statistics such as void size function, filament size function, void autocorrelations, filament autocorrelations, and void-filament cross-correlations encode complementary constraints on fundamental parameters including the dark energy equation of state (w_0, w_a), matter density Ω_m , amplitude of matter fluctuations σ_8 , and neutrino masses m_ν . These summary statistics exploit different cosmological dependencies than standard clustering: voids are particularly sensitive to dark energy and modified gravity through the Alcock-Paczyński effect and void-galaxy cross-correlations, while filamentary structures trace the anisotropic collapse history sensitive to σ_8 and growth.

Finally, I will show how the ASTRA algorithm can be leveraged to identify and characterize the cosmic web in DESI data. I will present preliminary results of cosmic web structures extracted using ASTRA on DESI's EDR and public DR1 data releases.

43

Interplay between Spatial Curvature and Multifield Dynamics in Exponential Quintessence

Authors: Diego Gallego¹; JOHN BAYRON ORJUELA-QUINTANA²

¹ *Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.*

² *UNIVERSIDAD DEL VALLE*

Corresponding Authors: diego.gallego@uptc.edu.co, john.orjuela@correounivalle.edu.co

Spatial curvature has recently gained renewed attention in quintessence models, as it offers a potential route to reconcile low-energy effective theories with realizations consistent with quantum gravity. On the other hand, multifield scenarios with non-geodesic or spinning trajectories have also proven relevant in this context, allowing for slow-roll regimes even in the presence of steep potentials.

In this work, we combine both aspects in a general two-field model with kinetic coupling and an exponential potential, inspired by string compactifications. We focus in particular on the effects of the second field on cosmological observables and their present values. We find that it introduces significant corrections to the radiation density, reflected, for instance, in the timing of radiation–matter equality. Beyond this, the additional degree of freedom does not substantially affect the model's ability to describe the observed universe, characterized by a transient state, although it becomes crucial for its long-term evolution. This understanding of the current cosmic state is achieved initially through numerical solutions, complemented by an analytical treatment that provides a broader interpretation of the system's behavior.

44

EFFECTOS SISTEMÁTICOS SOBRE LA ESTIMACIÓN DE H_0 CON ONDAS GRAVITACIONALES

Authors: MIGUEL ESPITIA¹; miguel cifuentes²

¹ *estudiante*

² *universidad pedagogica tecnologica de colombia*

Corresponding Authors: miguel.cifuentes2@udea.edu.co, paulcifu@gmail.com

Recientemente el aumento en la detección de señales transitorias de ondas gravitacionales (OG) emitidas por las coalescencias de sistemas binarios compactos (CBC) por parte de los interferómetros gravitacionales ha impulsado el desarrollo e implementación de diferentes técnicas estadísticas y ofrece una forma independiente de mejorar la precisión en la inferencia de los parámetros de expansión cosmológica, al combinarse con una medición independiente del corrimiento al rojo, ya sea

a partir de una contraparte electromagnética en el caso de una sirena brillante o utilizando distintas técnicas estadísticas en el caso de sirenas oscuras. Sin embargo, el uso de estas técnicas estadísticas para la determinación de los parámetros cosmológicos puede verse comprometido por la introducción de errores sistemáticos asociados a la selección del modelo de distribución poblacional, el modelo de la tasa de fusión de agujeros negros binarios (BBH) y la posibilidad de que no todas las fuentes sean igualmente detectables, ya sea por la sensibilidad del detector u otras limitaciones instrumentales.

El objetivo de este trabajo es determinar los efectos de los errores sistemáticos sobre la inferencia de la constante de expansión de Hubble H_0 , mediante la implementación de un enfoque bayesiano por parte de un equipo creado para el proceso de análisis usando el código de inferencia bayesiana ICAROGW, para analizar eventos simulados (ES) de BBH por parte de un equipo alterno encargado del proceso simulación, sin conocimiento previo de los valores inyectados de los parámetros y modelo poblacional de los BBH usados para su proceso de simulación. Este tipo de metodología se conoce Desafío de Datos Simulados con Parámetros Ocultos (Blinded-MDC), se usa para evaluar la confiabilidad de los métodos de inferencia basados en sirenas estándar oscuras. Los resultados de este estudio indican que el método de análisis y la configuración del código funcionan adecuadamente cuando el modelo poblacional astrofísico utilizado en la generación de datos simulados es el mismo que el empleado en el análisis, el código ICAROGW puede recuperar correctamente los VIP. Aumentar el número ES y utilizar señales sintéticas de ondas gravitacionales comúnmente denominadas inyecciones para la estimación de efectos de selección (IES) mejora la estimación de H_0 . No obstante, si el modelo poblacional evoluciona con el corrimiento al rojo y esta evolución no se incorpora en el análisis, se introduce un error sistemático significativo que afecta la estimación. Este sesgo surge de la correlación entre el corrimiento al rojo inferido y los parámetros de masa poblacional, lo que afecta directamente la inferencia de los parámetros cosmológicos.

Finalmente, este estudio resalta la importancia de comprender la interacción entre las suposiciones astrofísicas y los parámetros cosmológicos, especialmente ante la presencia de fenómenos impredecibles o poco comprendidos que desafían los modelos teóricos vigentes, así como ante el aumento anticipado en la detección de

eventos. Además, propone un marco para evaluar la fiabilidad de las inferencias
II
cosmológicas y analizar la robustez de otras técnicas derivadas de la cosmología de
sirenas estándar, en contextos que incluyen escenarios de sirenas oscuras.

27

Simulated LAE galaxies during Reionization

Author: Luz Ángela García¹

¹ *Universidad ECCI*

Corresponding Author: lagarciap03@gmail.com

In this work, we study the number density of Lyman Alpha Emitter (LAE) galaxies, their physical properties, and synthetic spectra at redshift ~ 6 using high-resolution hydrodynamical simulations with radiative transfer from the Thesan project. By recreating the scenario described in Becker et al. 2018, we test the hypothesis that observations to date are missing the vast majority of the high-redshift galaxies' signals since they are extremely faint and, thus, are out of the observational limits of our current telescopes. We also follow the evolution of the neutral Hydrogen fraction, the chemical enrichment of the circum- and intergalactic medium, and the specific star formation rate of galaxies in the simulation at the end of Reionization, and evaluate why the detections from HST and the Silverrush project significantly underestimate the number of faint galaxies. Our study indicates an observational bias to massive galaxies in the field. Thus, we forecast the properties of the dwarf galaxies responsible for completing the budget of ionizing photons that concluded the Epoch of Reionization.

30

Analytical Description of Baryonic Matter Fluctuations Using Jeans Filtering Functions in Second-Order Cosmological Perturbation Theory

Authors: Diego Fernando Fonseca Moreno¹; Leonardo Castañeda Colorado²; Luz Ángela García³

¹ *Universidad Nacional de Colombia/Universidad Antonio Nariño*

² *Universidad Nacional de Colombia*

³ *Universidad ECCI*

Corresponding Authors: lcastanedac@unal.edu.co, dffonsecam@unal.edu.co, lgarciap@ecc.edu.co

Cosmological perturbation theory provides the fundamental framework for describing the evolution of the matter-energy density field in an expanding universe and serves as the basis for understanding the formation of large-scale structures within the Λ CDM paradigm. In this work, we present an analytical approach to describe the evolution of fluctuations—small deviations from the mean density—in a mixed fluid composed of cold dark matter (CDM) and baryonic matter. Assuming that the universe is governed by General Relativity (GR), we employ the Vlasov equation to derive the general equations of motion for this system, incorporating baryonic effects through the stress tensor by considering only the contributions from baryonic pressure. We then introduce the Jeans Filtering Functions (JFF) as a biasing tool that allows us to describe baryonic fluctuations by using CDM as a tracer through analytical methods. First- and second-order solutions are obtained through a single iteration. Finally, we highlight analytical solutions for baryonic fluctuations in the density and velocity fields, which can be readily computed and provide insights into the role of baryons in the Large-Scale Structure (LSS) of the Universe.

45

ASTRA: clasificación cosmológica de la red cósmica

Author: Diana Carolina Zapata Zuluaga¹

Co-authors: Jaime E. Forero-Romero²; Juliana Hernández-Hernández²; Sofía Guevara-Montoya³; Valeria Torres-Gomez²

¹ *Universidad de Antioquia*

² *Universidad de los Andes*

³ *Universidad Nacional de Colombia*

Corresponding Authors: soguevaram@unal.edu.co, v.torresg23@uniandes.edu.co, juli.hernandez0109@gmail.com, je.forero@uniandes.edu.co, dianac.zapata@udea.edu.co

La red cósmica suele describirse en términos de filamentos, vacíos, nudos y láminas. Estudiarla permite caracterizar su morfología y profundizar en la estructura a gran escala del Universo, lo cual resulta fundamental para acotar parámetros cosmológicos como la materia oscura, la energía oscura y la geometría del Universo. La distribución y propiedades de sus componentes responden de forma sensible a la cosmología subyacente, convirtiendo su clasificación precisa en una herramienta clave para pruebas cosmológicas. Para identificar estos componentes se han desarrollado enfoques diversos: reconstrucción del campo de densidad en mallas; criterios tensoriales basados en autovalores; y métodos geométrico-topológicos como extracción de esqueletos (Morse–Smale) y homología persistente, entre otros.

En esta charla presentamos ASTRA (Algorithm for Stochastic Topological RAnking; Forero-Romero et al., 2025), un nuevo método de clasificación probabilística de la red cósmica que opera directamente sobre las posiciones observadas de galaxias y un catálogo aleatorio correspondiente. A diferencia de técnicas que requieren reconstruir el campo de densidad y filtrar morfologías, ASTRA parte del marco natural de triangulación de Delaunay y usa la conectividad del grafo (aristas y vecindarios) como portadora de la señal estructural. Además, al incorporar explícitamente catálogos aleatorios con la misma máscara y función de selección, garantiza consistencia geométrica y mantiene sensibilidad incluso en regímenes de muestreo disperso (baja densidad). Esta clasificación robusta de los componentes de la red cósmica permite calcular funciones de autocorrelación y correlación cruzada entre ellos, siendo particularmente relevante la correlación cruzada vacío-filamento, cuya amplitud y dependencia con la escala proporcionan restricciones directas sobre parámetros cosmológicos fundamentales.

Así, esta presentación describe los fundamentos y la implementación de ASTRA para clasificar filamentos, vacíos, nudos y láminas en surveys de galaxias, con miras a su aplicación en el cálculo de estadísticos de correlación para análisis cosmológicos. Se mostrarán resultados de cómo el método opera sobre datos de DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument), el mayor cartografiado espectroscópico de galaxias hasta la fecha, aplicado tanto al Early Data Release (EDR) como al Data Release 1 (DR1). Se presentarán algunos resultados de la identificación de vacíos con ASTRA, demostrando su efectividad en este tipo de estructuras.

Esta charla corresponde a la segunda de cuatro presentaciones coordinadas en este evento sobre ASTRA y DESI.

46

Cosmología de la red cósmica con DESI: Análisis de EDR y DR1

Author: Juliana Hernández¹

Co-authors: Diana Carolina Zapata Zuluaga²; Sofía Guevara-Montoya³; Valeria Torres-Gomez⁴

¹ *Universidad de Los Andes*

² *Universidad de Antioquia*³ *Universidad Nacional de Colombia*⁴ *Universidad de los Andes*

Corresponding Authors: soguevaram@unal.edu.co, dianac.zapata@udea.edu.co, v.torresg23@uniandes.edu.co, j.hernandezh2@uniandes.edu.co

El Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) está revolucionando la cosmología observacional mediante el mapeo de decenas de millones de espectros de galaxias y cuásares a través de 14,000 grados cuadrados y un rango de redshift de $z \sim 0$ a $z \sim 3.5$. Con un volumen muestreado de aproximadamente 20 Gpc^3 , DESI ofrece una oportunidad sin precedentes para estudiar la estructura a gran escala del Universo más allá de las tradicionales funciones de correlación de dos puntos.

La caracterización de la red cósmica en los catálogos de galaxias de DESI permite explorar propiedades estadísticas y topológicas que capturan información no-Gaussiana complementaria a los análisis estándar de BAO y RSD. Las estadísticas basadas en la red cósmica, como autocorrelaciones de vacíos, autocorrelaciones de filamentos y correlaciones cruzadas vacío-filamento, son sensibles a parámetros cosmológicos fundamentales incluyendo la ecuación de estado de energía oscura (w_0 , w_a), la densidad de materia Ω_m , la amplitud de fluctuaciones σ_8 y las masas de neutrinos m_ν , explotando dependencias cosmológicas distintas a las del clustering tradicional.

En esta charla se presentan los resultados globales obtenidos con el método ASTRA (Algorithm for Stochastic Topological RAnking; Forero-Romero et al., 2025) aplicados a los catálogos del Early Data Release (EDR) y del Data Release 1 (DR1) de DESI. Se mostrará en detalle la estructura de los datos públicos disponibles en Zenodo, que incluyen clasificaciones probabilísticas por tipo de entorno cósmico (vacío, filamento, lámina y nudo), catálogos de grupos Friend-of-Friends, listas de pares y distribuciones de pertenencia derivadas de conteos de vecinos. A partir de estos productos se presentarán resultados preliminares que incluyen histogramas de redshift por tipo de entorno, funciones de distribución acumulada (CDF) y medidas de entropía de Shannon como trazadores de la complejidad estructural y la diversidad topológica en diferentes épocas cósmicas. También se mostrarán proyecciones principales (PCA) de las estructuras identificadas y una comparación cuantitativa entre EDR y DR1, que evidencia el impacto del aumento en volumen y densidad de galaxias sobre la completitud y resolución de la red cósmica detectada. Esta presentación proporciona una visión general del panorama estadístico de la red cósmica en DESI y establece el contexto para los análisis detallados de vacíos y filamentos que se presentan en la siguiente charla.

42

Vacíos y filamentos en la red cósmica a partir de datos de DESI: Funciones de tamaño como pruebas cosmológicas

Author: Sofía Guevara-Montoya¹

Co-authors: Diana Carolina Zapata Zuluaga²; Jaime E. Forero-Romero³; Juliana Hernández-Hernández³; Valeria Torres-Gomez³

¹ *Universidad Nacional de Colombia*² *Universidad de Antioquia*³ *Universidad de los Andes*

Corresponding Authors: dianac.zapata@udea.edu.co, soguevaram@unal.edu.co, juli.hernandez0109@gmail.com, v.torresg23@uniandes.edu.co, je.forero@uniandes.edu.co

En la última década, los vacíos cósmicos se han consolidado como uno de los trazadores más prometedores para obtener pruebas cosmológicas independientes y sensibles a la energía oscura. Su estudio, junto con el de los filamentos y demás componentes de la red cósmica, permite explorar la estructura a gran escala del Universo más allá de los análisis basados en la función de correlación de dos puntos. Estos enfoques no estándar buscan capturar información geométrica y topológica del campo de densidad, lo que requiere una clasificación robusta de la red cósmica.

En este trabajo presentamos una clasificación probabilística de vacíos y filamentos empleando el método ASTRA (Algorithm for Stochastic Topological RAnking), descrito en Forero-Romero et al.

(2025), aplicado al catálogo de galaxias brillantes (BGS) del Data Release 1 del Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI). ASTRA implementa iteraciones estocásticas basadas en triangulaciones de Delaunay, combinando galaxias observadas con puntos aleatorios que permiten muestrear las regiones de baja densidad. De estas iteraciones se obtiene un parámetro escalar que cuantifica la conectividad local cuyo valor permite asignar de forma consistente el tipo de entorno cósmico a cada objeto. Para analizar la morfología global de estas estructuras, empleamos el algoritmo Friend-of-Friends (FoF), que agrupa los puntos clasificados en conjuntos coherentes y permite medir sus tamaños.

Como resultado central presentamos la función de tamaños de vacíos (Void Size Function, VSF) y la función de tamaños de filamentos (Filament Size Function, FSF) para las galaxias del Bright Galaxy Survey del DR1 de DESI correspondientes al rango de redshift $0.1 < z < 0.2$. En esta charla mostraré cómo estos resultados pueden ser comparados con simulaciones cosmológicas para restringir parámetros cosmológicos y mejorar la precisión de las pruebas cosmológicas actuales.

Nota: La presente ponencia, a cargo de Sofía Guevara-Montoya, corresponde a un trabajo realizado en colaboración con Diana C. Zapata-Zuluaga, Valeria Torres-Gómez, Juliana Hernández y Jaime E. Forero-Romero. Asimismo, forma parte del conjunto de cuatro ponencias presentadas en este evento, siendo esta la última en ser expuesta.

49

Afectación de la masa de las estrellas de neutrones por acoplamiento con el Axión en gravedad modificada

Author: Sebastián Moreno Chalacá¹

Co-author: LUIS NORBERTO GRANDA VELASQUEZ ¹

¹ Universidad del Valle

Corresponding Authors: sebastian.chalaca@correounivalle.edu.co, luis.granda@correounivalle.edu.co

Se investiga la estructura de estrellas de neutrones en el marco de una teoría escalar-tensorial axiónica. El modelo se define por un acoplamiento no mínimo entre el campo de axión y la curvatura, descrito por la función $f(\phi) = 1 + \xi\phi^2$, y se analiza en el régimen cosmológico post-inflacionario, donde el axión oscila en torno al mínimo de su potencial. Se derivan las ecuaciones de Tolman-Oppenheimer-Volkoff (TOV) modificadas en el marco de Einstein, las cuales se resuelven numéricamente para obtener la estructura interna y externa de la estrella. A partir de estas soluciones, se calcula la masa y el radio observables en el marco de Jordan. El análisis emplea tres EoS nucleares realistas (WFF1, SLy, APR), aproximadas como politropos a trozos. Los resultados demuestran que el acoplamiento induce escalarización espontánea, generando estrellas con masa máxima superior a la predicha por la Relatividad General.

Se encontró que, si bien las curvas M-R son consistentes con los límites de compacidad de GW170817, presentan tensión con las mediciones de radio de NICER. No obstante, el modelo (especialmente con la EoS APR) logra producir estrellas de neutrones con masas de hasta $2.22M_{\odot}$, posicionándolas en el umbral de la “brecha de masa” observacional. Esto confirma que la teoría estudiada es un mecanismo viable para la existencia de estrellas de neutrones supermasivas, aunque su compatibilidad fenomenológica depende fuertemente de la EoS nuclear y de los parámetros del modelo axiónico.

37

From Entropy to Geometry

Author: JOHN BAYRON ORJUELA-QUINTANA¹

Co-authors: Cesar A. Valenzuela-Toledo ²; SANTIAGO GARCIA SERNA

¹ UNIVERSIDAD DEL VALLE² Departamento de Física, Universidad del Valle**Corresponding Authors:** john.orjuela@correounivalle.edu.co, cesar.valenzuela@correounivalle.edu.co, santiago.serna@correounivalle.edu.co

The profound connection between gravity and thermodynamics has been firmly established since Jacobson's seminal result, where the Einstein field equations were derived from the Bekenstein–Hawking entropy–area relation under the assumption of local thermodynamic equilibrium on local Rindler horizons. Deviations from this entropy law necessarily induce non-equilibrium corrections, as illustrated by the thermodynamic interpretation of modified gravity $f(R)$ theories.

Motivated by theoretical arguments that the entropy–area relation may admit fundamental generalizations, particularly within non-extensive entropy formalisms, a central question naturally arises: what gravitational dynamics follow from the most general entropy prescription? To address this, we consider an entropy density of the form $s = f(a)$, with no restriction on its dependence on the local horizon area density a . We show that such generalized laws inevitably require a non-equilibrium thermodynamic treatment in order to preserve the covariant conservation of the energy–momentum tensor. Our framework thus provides a systematic method to derive consistent gravitational field equations directly from generalized entropy principles, independently of any underlying Lagrangian formulation.

Previous extensions of the thermodynamics-gravity paradigm, often implemented within the Cai–Kim formalism for homogeneous and isotropic spacetimes, have either neglected the unavoidable non-equilibrium contributions associated with generalized entropies, or absorbed them into an effective energy–momentum tensor. While the latter prescription is viable when the modified gravity action is explicitly known, it is not generally applicable—for instance, in the case of Tsallis entropy, for which no Lagrangian description exists.

In contrast, our framework establishes the precise and universal conditions under which consistent field equations emerge from a generalized entropy principle. This constitutes one of the most general non-equilibrium extensions of the thermodynamic derivation of gravity, providing a robust theoretical basis to investigate the gravitational implications of non-extensive entropies.

48

Quality control and strong lens discovery in DESI: an artificial intelligence approach to cosmological spectroscopic surveys

Author: Valeria Torres-Gomez¹**Co-author:** Jaime E. Forero-Romero¹¹ Universidad de los Andes**Corresponding Authors:** v.torresg23@uniandes.edu.co, je.forero@uniandes.edu.co

Large modern spectroscopic surveys require robust quality-control systems that operate at the scale of millions of observations. The Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) maps the large-scale structure of the Universe through multi-object spectroscopy at unprecedented speed, collecting tens of millions of spectra every year from galaxies and quasars. Efficiently identifying anomalies in these data is essential both to ensure the quality of cosmological measurements and to discover astrophysically exceptional objects, such as gravitational lens systems with direct cosmological utility.

In this work we present a fast, unsupervised artificial intelligence pipeline to isolate anomalies in DESI data, applied to more than 58 million calibrated and coadded observations from the forthcoming Data Release 2. The method employs Uniform Manifold Approximation and Projection (UMAP), a nonlinear dimensionality-reduction technique, to construct a low-dimensional embedding that preserves local neighborhood structure in spectral feature space. We then apply a Friends of Friends (FoF) connectivity criterion to this embedding to partition the distribution and identify low-density structures and isolated points as candidate anomalies.

The analysis yields two coherent subsets. The first contains patterns linked to flukes in the DESI reduction pipeline and enables data-quality monitoring across the survey.

The second contains astrophysically interesting cases, including strong gravitational-lens candidates characterized by superposed redshift systems. We recover known lenses and suggest additional candidates for targeted observational follow-up.

In this talk I will show how this procedure, scalable to tens of millions of observations, generates compact, ranked anomaly sets that accelerate visual inspection, improving the reliability of survey products and enabling the efficient assembly of gravitational-lens samples with cosmological utility.

50

Multiwavelength Luminosity Correlations in Quasars and Their Potential as Standard Candles

Author: Sebastian Rueda Blanco¹

Co-authors: Camilo Delgado Correal¹; Mario Armando Higuera Garzón¹

¹ *Universidad Nacional de Colombia*

Corresponding Authors: m.camilo.d@gmail.com, mahiguerag@unal.edu.co, sruedab@unal.edu.co

Quasars are among the most luminous and distant sources in the Universe, offering great potential as standard candles for cosmology. However, the diversity in their spectral energy distributions (SEDs) and the dependence of luminosity on physical parameters introduce significant challenges. In this work, we present a statistical analysis of quasar luminosities across multiple spectral bands, from optical to X-rays, aimed at identifying robust correlations and scaling relations that could serve as distance indicators. Using a compiled dataset with well-defined redshifts and multiwavelength fluxes, we test the stability of these relations and their dependence on intrinsic and environmental factors. Preliminary results suggest that certain luminosity ratios display low dispersion and may provide a viable path toward standardization. This analysis contributes to the broader effort of establishing quasars as complementary cosmological probes beyond Type Ia supernovae.

51

Cosmología de la red cósmica con DESI: Análisis de EDR y DR1

Author: Juliana Hernández^{None}

Co-authors: Diana Carolina Zapata Zuluaga¹; Jaime E. Forero-Romero²; Sofía Guevara-Montoya³; Valeria Torres-Gomez²

¹ *Universidad de Antioquia*

² *Universidad de los Andes*

³ *Universidad Nacional de Colombia*

Corresponding Authors: v.torresg23@uniandes.edu.co, soguevaram@unal.edu.co, j.hernandezh2@uniandes.edu.co, dianac.zapata@udea.edu.co, je.forero@uniandes.edu.co

El Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) está revolucionando la cosmología observacional mediante el mapeo de decenas de millones de espectros de galaxias y cuásares a través de 14,000 grados cuadrados y un rango de redshift de $z \sim 0$ a $z \sim 3.5$. Con un volumen muestreado de aproximadamente 20 Gpc^3 , DESI ofrece una oportunidad sin precedentes para estudiar la estructura a gran escala del Universo más allá de las tradicionales funciones de correlación de dos puntos.

La caracterización de la red cósmica en los catálogos de galaxias de DESI permite explorar propiedades

estadísticas y topológicas que capturan información no-Gaussiana complementaria a los análisis estándar de BAO y RSD. Las estadísticas basadas en la red cósmica, como autocorrelaciones de vacíos, autocorrelaciones de filamentos y correlaciones cruzadas vacío-filamento, son sensibles a parámetros cosmológicos fundamentales incluyendo la ecuación de estado de energía oscura (w_0 , w_a), la densidad de materia Ω_m , la amplitud de fluctuaciones σ_8 y las masas de neutrinos m_ν , explotando dependencias cosmológicas distintas a las del clustering tradicional.

En esta charla se presentan los resultados globales obtenidos con el método ASTRA (Algorithm for Stochastic Topological RAnking; Forero-Romero et al., 2025) aplicados a los catálogos del Early Data Release (EDR) y del Data Release 1 (DR1) de DESI. Se mostrará en detalle la estructura de los datos públicos disponibles en Zenodo, que incluyen clasificaciones probabilísticas por tipo de entorno cósmico (vacío, filamento, lámina y nudo), catálogos de grupos Friend-of-Friends, listas de pares y distribuciones de pertenencia derivadas de conteos de vecinos. A partir de estos productos se presentarán resultados preliminares que incluyen histogramas de redshift por tipo de entorno, funciones de distribución acumulada (CDF) y medidas de entropía de Shannon como trazadores de la complejidad estructural y la diversidad topológica en diferentes épocas cósmicas. También se mostrarán proyecciones principales (PCA) de las estructuras identificadas y una comparación cuantitativa entre EDR y DR1, que evidencia el impacto del aumento en volumen y densidad de galaxias sobre la completitud y resolución de la red cósmica detectada. Esta presentación proporciona una visión general del panorama estadístico de la red cósmica en DESI y establece el contexto para los análisis detallados de vacíos y filamentos que se presentan en la siguiente charla.

38

Curvas de rotación como pruebas a gravedad modificada.

Author: Juan Camilo Torres Rojas¹

Co-author: Leonardo Castañeda²

¹ *Estudiante*

² *Universidad Nacional*

Corresponding Authors: lcastanedac@unal.edu.co, jctorresroj@unal.edu.co

Curvas de rotación como pruebas a gravedad modificada

En la actualidad el problema de la masa faltante en las curvas de rotación galácticas, tiene dos ideas enfrentadas: por un lado, suponer que existe una materia que no interactúa electromagnéticamente, pero si gravitacionalmente, la cual recibe el nombre de materia oscura (Cold Dark Matter - CDM) [11] y por otro lado, creer que es necesario realizar alguna modificación a las leyes que describen el movimiento (Modificate of Newtonian Dynamics -MOND) [9][4]. Sin embargo, desde hace ya un tiempo han comenzado a surgir otras teorías alternativas, como teorías $f(R)$ [6], teorías de espacios tiempos multifraccionales [3], entre muchas otras. Las cuales quieren dar respuesta a la fenomenología observada, aceptando o negando alguna de las dos consideraciones anteriores.

Debido a la gran cantidad de modelos existentes, la presente investigación encuentra su motivación al estudiar un tipo particular de propuesta, donde no se descarta la materia oscura pero se reduce la cantidad necesaria para reproducir la curva de rotación galáctica [1]. Esto se logra, al adicionar una interacción materia bariónica - materia oscura tipo potencial tipo Yukawa. Es decir, para esta idea el potencial total que actúa sobre los bariones, se describiría como $\phi = \phi_N + \beta\phi_Y$, donde ϕ_N es el potencial Newtoniano usual descrito por la ecuación Poisson:

$$\nabla^2 \phi_N = 4\pi G(\rho_B + \rho_D) \text{ Perola contribución de Yukawa, obedece la ecuación de Helmholtz modificada : } (\nabla^2 - \lambda^{-2})\phi_Y = 4\pi G\rho_D \text{ Donde } \rho_D \text{ es la distribución de densidad de materia oscura. El parámetro } \beta \text{ mide la fuerza de esta interacción, mientras que el segundo parámetro } \lambda, \text{ determina el rango. En concreto, toda la componente de materia oscura actuando sobre los bariones se describiría como:}$$

$$\Phi_D(\mathbf{x}) = -G \int \frac{\rho_D(\mathbf{x}')}{|\mathbf{x}-\mathbf{x}'|} (1 + \beta e^{-|\mathbf{x}-\mathbf{x}'|/\lambda}) d^3 \mathbf{x}'$$

Para analizar la validez de esta propuesta, se selecciono el potencial NFW **[10]** y adicionalmente, se tomaron las curvas de rotación de la base de datos SPARC **[7]**, como posibles testadores de su

existencia. Asimismo, a diferencia de otras investigaciones similares, este proyecto innova al incluir la herramienta GalRotpy ^[5], creada en el observatorio astronómico nacional y su respectiva adaptación para el estudio.

En cuando al manejo de los datos, cada curva de rotación debe pasar por un proceso de ajuste, es decir, se debe estimar la cantidad de masa presente en dicho objeto. Para ello se emplea la estadística Bayesiana, la cual, a través del proceso MCMC genera un estimativo de la masa, este resultado debe ser contrastado con la literatura ^[2]^[8]. Una vez ajustada la curva, se vuelve a repetir el proceso pero incluyendo el potencial de Yukawa. Evidenciando con ello, como modifica la cantidad de materia oscura necesaria para adecuarse a la curva de rotación.

Tomando la Vía Láctea como objeto de prueba, se ha logrado obtener un estimativo de $\lambda = (5.94^{+3.14}_{-3.97}) \text{ kpc}$ y $\beta = 0.56^{+0.33}_{-0.40}$. *Resultado que es relevante, por dos motivos : primero, desde la estadística no se puede descartar este modelo y segundo, β para el universo cercano.*

Referencias.

- [1] **A. Almeida, L. Amendola, and V. Niro.** “Galaxy rotation curves in modified gravity models”. In: Journal of Cosmology and Astroparticle Physics JCAP 012 (2018), pp. 1–22. doi: <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2018/08/012>.
- [2] **Juan Camilo Torres.** Estudio de la razón Materia Bariónica - Materia Oscura con curvas de rotación galáctica. Bachelor Thesis. Universidad Nacional de Colombia 2020.
- [3] **G. Calcagni and G.U. Varieschi.** “Gravitational potential and galaxy rotation curves in multi-fractional spacetimes”. In: J. High Energ. Phys. 4 (2022). doi: [https://doi.org/10.1007/JHEP08\(2022\)024](https://doi.org/10.1007/JHEP08(2022)024).
- [4] **B. Famaey and S. McGaugh.** “Modified Newtonian Dynamics (MOND): Observational Phenomenology and Relativistic Extensions”. In: Living Rev. Relativ 015 (2012). doi: <https://doi.org/10.12942/lrr-2012-10>.
- [5] **Andrés Granados et al.** “GalRotpy: a tool to parametrize the gravitational potential of disc-like galaxies”. In: New Astronomy 82 (2021), p. 101456. issn: 1384-1076. doi: <https://doi.org/10.1016/j.newast.2020.101456>.
- [6] **Luisa Ostorero, Ivan De Martino Antonaldo Diaferio.** “Dynamics of dwarf galaxies in f(R) gravity”. In: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 519 (3 2023), pp. 4424–4433. doi: <https://doi.org/10.1093/mnras/stad010>.
- [7] **F. Lelli, S. McGaugh, and J. Schombert.** “SPARC: Mass Models for 175 disk Galaxies with Spitzer Photometry and Accurate Rotation Curves”. In: Astro-Physycal Journay 152 (Nov. 2016), p. 157.
- [8] **Itamar López.** “Reconstrucción de los perfiles de masa en galaxias de disco con base en sus propiedades de lente gravitacional y curvas de rotación”. Master thesis. Universidad Nacional de Colombia, 2020.
- [9] **M. Milgrom.** “A modification of the newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis”. In: Astrophysycal Journal 270 (1983), pp. 365–370. doi: <https://doi.org/10.1086/161130>.
- [10] **J. Navarro, C. Frenk, and S. White.** “A universal denisty profile from hierarchical clustering”. In: The AstroPhysical Journay 490 (Dec. 1997), pp. 493–507. doi: <https://doi.org/10.1086/304888>.
- [11] **V. Rubin, W. Ford, and N. Thonnard.** “Rotationa properties of 21 Sc Galaxies with large range of luminosities and radii, from NGC4605 (R = 4kpc) to UGC2885 (R = 122kpc)”. In: The Astrophysical Journal 238 (1980), pp. 471–487. doi: <https://doi.org/10.1086/158003>.