



LA TENSIÓN DE HUBBLE COMO DESAFÍO: OPORTUNIDADES DE PRUEBAS PARA EL CAMPO YUKAWA INVERSO (IYF)

FABIÁN ROBLEDO¹

Universidad de Carabobo. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones. Departamento de Señales y Sistemas¹.

frobledo@uc.edu.ve

Recibido: 27/07/2025, Revisado: 03/08/2025, Aceptado: 12/08/2025

Resumen

La tensión de Hubble, una discrepancia significativa entre las estimaciones de la constante de Hubble H_0 del Universo temprano basadas en la CMB de Planck ($67.4 \pm 0.5 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}$), del Universo local (escalera de distancias SH0ES, $73.0 \pm 1.0 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$) y otros métodos de estimación, desafía el modelo estándar Λ CDM. Este artículo analiza esta discrepancia comparando métodos como CMB, escalera de distancias, lentes gravitacionales, BAO y el modelo del Campo Yukawa Inverso (IYF), entre otros. El IYF deriva teóricamente $H_0^{\text{máx}} \approx 86.31 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, sugiriendo una expansión más rápida sin necesidad de energía oscura. Aunque innovador, el IYF enfrenta desafíos por su discrepancia con datos modernos y la falta de validación contra la CMB. Se propone analizar el IYF con datos de Pantheon+, DESI y simulaciones con CLASS/CAMB en futuros estudios complejos, para evaluar su consistencia, incentivando nuevas perspectivas sobre la dinámica cósmica.

Palabras clave: Tensión de Hubble, constante de Hubble, gravedad modificada, Campo Yukawa Inverso, Cosmología Λ CDM.

The Hubble tension as a challenge: Opportunities for testing the Inverse Yukawa Field (IYF)

Abstract

The Hubble tension, a significant discrepancy between estimates of the Hubble constant H_0 from the early Universe based on Planck's CMB ($67.4 \pm 0.5 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}$), from the local Universe (SH0ES distance ladder, $73.0 \pm 1.0 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$), and other estimation methods, challenges the standard Λ CDM model. This paper analyzes this discrepancy by comparing methods such as CMB, distance ladder, gravitational lensing, BAO, and the Inverse Yukawa Field (IYF) model, among others. The IYF theoretically derives $H_0^{\text{máx}} \approx 86.31 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, suggesting a faster expansion without the need for dark energy. Although innovative, the IYF faces challenges due to its discrepancy with modern data and the lack of validation against the CMB. It is proposed to analyze the IYF with data from Pantheon+, DESI, and simulations with CLASS/CAMB in future complex studies, to assess its consistency, encouraging new perspectives on cosmic dynamics.

Keywords: Hubble tension, Hubble constant, modified gravity, Inverse Yukawa field, Λ CDM cosmology.

1. Introducción

La constante de Hubble H_0 , un pilar fundamental de la cosmología, mide la velocidad de expansión actual del Universo, indicando cuán rápido se alejan las galaxias unas de otras en función de su distancia, de acuerdo a la ley de Hubble:

$$v = H_0 r \quad (1)$$

Donde v es la velocidad de recesión de una galaxia (km/s) y r es la distancia a la galaxia (Mpc). Sin embargo, las mediciones modernas de H_0 revelan una discrepancia significativa, conocida como la “tensión de Hubble”, entre los valores obtenidos del Universo temprano, basados en el análisis del fondo cósmico de microondas (CMB), y los del Universo local, derivados de observaciones de estrellas variables Cefeidas, supernovas tipo Ia y métodos alternativos de estimación, que incluyen oscilaciones acústicas de bariones (BAO), lentes gravitacionales, modelos MoND y ondas gravitacionales, entre otros.

Esta discrepancia, con una significación estadística de aproximadamente 5σ , sugiere que el modelo estándar de cosmología Λ CDM podría ser incompleto o que existen errores sistemáticos en las mediciones (Di Valentino et al., 2021).

Las mediciones del CMB, como las realizadas por la colaboración Planck, indican $H_0 = 67.4 \pm 0.5 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$, mientras que la escalera de distancias cósmicas, liderada por el equipo SH0ES, reporta $H_0 = 73.0 \pm 1.0 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ (Planck Collaboration, 2020; Riess et al., 2022). Otros métodos, como las lentes gravitacionales y las BAO, ofrecen valores intermedios, pero no resuelven la tensión. Este desafío ha motivado propuestas de nueva física, incluyendo teorías de gravedad modificada.

Entre estas propuestas, se ha propuesto que un potencial escalar o Campo Yukawa Inverso (IYF), añadido a la gravedad

en un marco de dinámica newtoniana modificada (MoND), puede derivar la ley de Hubble y estimar teóricamente un valor máximo $H_0 \approx 86.31 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ (Falcón, 2014, 2017). Este valor, significativamente más alto que las mediciones del CMB y la escalera de distancias, plantea un desafío para su conciliación con datos observacionales modernos, pero ofrece una perspectiva alternativa para modelar la dinámica cósmica.

Este artículo tiene dos objetivos principales: Primero, analizar la tensión de Hubble y comparar las mediciones de H_0 de diferentes métodos, incluyendo la propuesta del IYF; segundo, evaluar críticamente ese modelo, destacando sus fortalezas, limitaciones y el potencial de su formalismo para contribuir a la cosmología, sujeto a validaciones adicionales frente a observaciones cosmológicas y análisis computacional multidimensional.

2. Análisis de las estimaciones de H_0 de acuerdo a diversas técnicas

La tensión de Hubble se manifiesta en la discrepancia entre las mediciones de H_0 derivadas de diferentes enfoques. Las observaciones del CMB (Planck), basadas en las fluctuaciones de densidad del Universo temprano, específicamente las de temperatura y polarización a un desplazamiento al rojo $z \approx 1100$, proporcionan una estimación robusta de $H_0 = 67.4 \pm 0.5 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ asumiendo el modelo Λ CDM (Planck Collaboration, 2020). Este valor es ampliamente aceptado en el contexto de medidas cosmológicas tempranas. Su principal fortaleza es su alta precisión, además es independiente de calibraciones locales, lo que elimina errores asociados a la escalera de distancias. Sin embargo, su principal debilidad es que asume la validez del modelo Λ CDM, y cualquier física desconocida en la evolución del universo desde $z \approx 1100$ hasta la actualidad podría introducir sesgos. También depende de procesos de sustracción de fuentes

en primer plano, lo que podría introducir errores sistemáticos si no se modelan correctamente.

En contraste con Planck, la escalera de distancias del equipo SH0ES (Supernovae and H0 for the Equation of State of dark energy), un proyecto que busca medir a H_0 con precisión, utiliza cefeidas (ley de Leavitt) para calibrar el brillo de supernovas tipo Ia y medir distancias a galaxias lejanas, ofreciendo un valor de $H_0 = 73.0 \pm 1.0 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ (Riess et al., 2022). Este valor es más rápido que el estimado por medio de la CMB, y es la razón que acuñó la frase “tensión de Hubble”. Este método es robusto debido a la alta luminosidad de las cefeidas, que permite observaciones precisas, y la calibración con datos de paralaje de Gaia y máseres en NGC 4258. Su fortaleza radica en su enfoque directo, basado en observaciones locales, y su independencia de modelos cosmológicos globales. Sin embargo, es susceptible a errores sistemáticos relacionados con el polvo galáctico, la metalicidad de las cefeidas y efectos de aglomeración estelar, que pueden afectar las estimaciones de distancia. Además, la rareza de supernovas Ia cercanas limita la muestra estadística.

En este sentido, el CCHP (Carnegie-Chicago Hubble Program), empleando un método que combina cefeidas con calibraciones de rama gigante: JAGB (J-Branch Asymptotic Giant Branch), TRGB (Tip of the Red Giant Branch), usando observaciones del Telescopio Espacial James Webb (JWST), ofrece la estimación intermedia dada por $H_0 = 69.96 \pm 1.12 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$, que reduce la tensión entre SH0ES y Planck, en una medición reciente y robusta (Freedman et al., 2024). Su fortaleza radica en la combinación de múltiples calibradores y el uso de observaciones infrarrojas de alta precisión con JWST, que reducen efectos de polvo y aglomeración, con diferentes enfoques basados en poblaciones estelares. Este valor

intermedio sugiere una posible reconciliación de la tensión de Hubble. Sin embargo, las diferencias entre los calibradores (especialmente cefeidas) y los métodos de SH0ES indican que aún existen problemas sistemáticos no resueltos.

Otros métodos, como las lentes gravitacionales fuertes de H0LiCOW (H0 Lenses in COSMOGRAIL’s Wellspring), que mide H_0 a través de retrasos temporales en imágenes de cuásares “lensados”, reportan un valor para la constante de $H_0 = 73.3 \pm 1.8 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ (H0LiCOW Collaboration, 2020). Su punto fuerte es que es un método independiente tanto del CMB como de la escalera de distancias, basado en geometría relativista y observaciones a desplazamientos al rojo intermedios, $z < 2$. La precisión ha mejorado con técnicas ciegas de análisis y observaciones multibanda. Sin embargo, depende de modelos del perfil de masa de las galaxias elípticas que actúan como lentes, lo que introduce errores sistemáticos si el modelo no es exacto. La muestra limitada de lentes gravitacionales también aumenta la incertidumbre.

Por otra parte, la aplicación del método de las oscilaciones acústicas de bariones (BAO) propuesto por la colaboración DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument) estima una $H_0 = 68.4 \pm 0.9 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$, (DESI Collaboration, 2024), utilizando correlaciones de galaxias y cuásares a desplazamientos al rojo intermedios y altos. Este método es robusto debido a su gran muestra estadística (millones de galaxias) y su dependencia de una escala física bien definida (el horizonte sónico). Es compatible con el CMB, y refuerza el modelo Λ CDM. Su debilidad principal es su dependencia de un modelo cosmológico para extrapolar H_0 , lo que podría introducir sesgos si el modelo es incompleto. Además, requiere combinar datos de BAO con otras observaciones, como nucleosíntesis del Big Bang, para obtener H_0 .

En un ámbito similar, el proyecto TDCOSMO (Lentes Gravitacionales con

Datos Cinemáticos, SLACS) propone $H_0 = 67.4 \pm 4.1 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$, ofreciendo un valor más cercano a las estimaciones cosmológicas, reduciendo errores sistemáticos en el perfil de galaxias elípticas (Birrer, 2020), y refinando a H0LiCOW. Su atractivo es la mejora en el modelado de perfiles de masa, lo que lo hace más compatible con las estimaciones cosmológicas. Sin embargo, la suposición de que las lentes comparten el mismo perfil de masa puede introducir sesgos, y la incertidumbre sigue siendo mayor que la de Planck o SH0ES.

Es oportuno referir también la estimación independiente de H_0 basada en la supernova Refsdal, que posee $z = 1.49$ y es la primera observada con múltiples imágenes debido al fenómeno de lente gravitacional, empleándose el método de Cosmografía de Retraso Temporal (TDC, Time-Delay Cosmography), estimándose $H_0 = 67.4 \pm 11 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$, si bien con mayor incertidumbre debido a la complejidad del modelo del lente, y no resuelve el problema de la tensión, (Kelly et al., 2018). En el análisis de la supernova Refsdal, se utilizan retrasos temporales de los caminos distintos seguidos por la luz en imágenes múltiples de una supernova “lensada”, relativamente fáciles de medir. Su particularidad es su independencia de otros métodos y su base en un solo evento bien estudiado. Sin embargo, la gran incertidumbre y la dependencia de modelos de lentes gravitacionales limitan su precisión, y la escasez de supernovas lensadas dificulta la mejora estadística.

En relación a propuestas de tipo gravedad modificada (MoND), el modelo del Campo Yukawa Inverso (IYF) define la adición de un campo escalar adicional al potencial gravitacional newtoniano. Este campo actúa como un complemento no local a la gravedad, permitiendo modelar la dinámica de objetos astronómicos a gran escala dentro del marco cosmológico de Friedmann-Robertson-Walker (AFRW).

El IYF está caracterizado por una escala de longitud, expresando el potencial total $U(r)$ con un término perturbativo adicional altamente significativo a grandes distancias, como:

$$U(r) = -\frac{GM}{r} + U_0(r - r_0)e^{-\frac{\alpha}{r}} \quad (2)$$

Donde G es la constante gravitacional, $U_0 = U_0(M)$, es un campo escalar heurístico, siendo M la masa, r es la distancia, y r_0 y α son parámetros que modulan la interacción gravitacional a grandes escalas, ajustados de acuerdo a mediciones de objetos estelares (Falcón 2014, 2017).

En la Fig. 1 se ilustra el IYF normalizado, dependiente de la distancia, reflejando su efecto gradual en la transición desde distancias cercanas, estelares, de cúmulos y cosmológicas. describiéndose los cambios y su efecto dinámico.

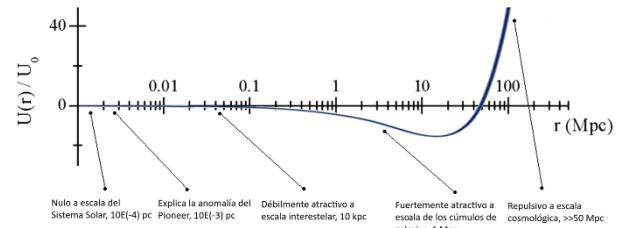


Fig. 1. Efectos del potencial IYF normalizado según la distancia. Adaptado de (Falcón, 2014).

A partir del modelo IYF, se deriva una cota superior para la constante de Hubble:

$$H_0^{\text{máx}} = \frac{4\pi G}{c} \approx 86.31 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1} \quad (3)$$

Siendo G es la constante gravitacional y c es la velocidad de la luz. Esta ecuación surge al modelar la dinámica de expansión cósmica para distancias mayores a 50 Mpc, donde el campo de Yukawa inverso se vuelve relevante y repulsivo. Al calibrar los parámetros del IYF con datos de 392 objetos de la NASA/IPAC Extragalactic Database (NED), se obtiene la cota indicada en la

ecuación (3). (Falcón 2017). La compatibilidad del IYF con experimentos de tipo Eötvös y curvas de rotación galácticas refuerza su potencial teórico (Falcón, 2014).

Este resultado excede significativamente las estimaciones observacionales modernas, lo que sugiere desafíos para su conciliación con datos del CMB y la escalera de distancias, pero debe tenerse presente que se trata de una cota superior teórica, si bien con el soporte experimental referido. Este enfoque busca explicar la expansión del Universo sin recurrir a la energía oscura o al modelo Λ CDM estándar.

La ventaja de este modelo radica en su intento de ofrecer una alternativa a las teorías gravitacionales convencionales, lo que podría ser relevante si las discrepancias en H_0 reflejan una física más allá de Λ CDM. Un valor tan alto como $86.31 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ podría, en teoría, indicar una expansión más rápida en escalas cosmológicas y un Universo más joven, desafiando las estimaciones presentes. Sin embargo, este modelo tiene varias debilidades críticas. El valor de H_0 (cota superior) es significativamente más alto que cualquier medición observacional moderna, lo que lo hace inconsistente con datos de CMB, BAO, lentes gravitacionales y la escalera de distancias. La literatura no muestra aún una aceptación amplia de este modelo, y no se encuentra evidencia aún de que haya sido corroborado por observaciones independientes.

Otros modelos de gravedad modificada, como la propuesta $f(T, T)$ de teleparalelismo, calibrada con datos de la escalera de distancias de SH0ES, han abordado la tensión de Hubble ajustando parámetros con datos de supernovas tipo Ia y BAO, obteniendo $H_0 = 70.5 \pm 1.2 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ (Duchaniya et al., 2024). Su punto robusto es que explora alternativas al modelo Λ CDM, lo que podría explicar discrepancias si la relatividad general no es suficiente. Sin embargo, depende de los datos

de SH0ES, heredando sus posibles errores sistemáticos, y el modelo $f(T, T)$ no está ampliamente aceptado, lo que limita su fortaleza frente a métodos observacionales directos.

De manera alternativa, el modelo teórico de Relatividad General con Autointeracción, GR-SI (General Relativity Self-Interaction), propone que H_0 varía con el redshift z , desde $73.06 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ a bajos z , hasta $67.28 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ a altos z (Sargent et al., 2024). En este contexto, se asume que el campo gravitatorio no solo es generado por la materia, sino que también puede interactuar consigo mismo, es decir, el campo gravitatorio puede influir en su propia dinámica o evolución.

Su punto fuerte es que intenta reconciliar las discrepancias entre medidas locales y cosmológicas, introduciendo un parámetro teórico adicional. Sin embargo, la falta de barras de error en los resultados y la naturaleza especulativa del modelo, que no está respaldado por observaciones directas, lo hacen menos robusto. Además, su dependencia de z complica las comparaciones directas con otras técnicas.

En el ámbito de otros métodos de estimación muy distintos, cabe referir la basada en ondas gravitacionales, como la de la colaboración LIGO/Virgo, basadas en GW170817, que estima $H_0 = 70 \pm 14 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ (LIGO Scientific Collaboration et al., 2017). Su fortaleza radica en su novedad y su independencia de otros métodos, utilizando fusiones de estrellas de neutrones y agujeros negros como “sirenas” estándar. Esto permite medir distancias directamente, sin necesidad de una escalera. Sin embargo, su gran incertidumbre refleja la escasez de eventos detectados. La precisión mejorará con más detecciones, pero actualmente es limitada para resolver la tensión.

Resumiendo lo hasta ahora discutido, la Tabla 1 presenta una comparación de las estimaciones de H_0 , indicando sus métodos.

Método/ Modelo	H_0 km s ⁻¹ Mpc ⁻¹	Referencia
CMB (Planck)	67.4 ± 0.5	Planck Collaboration (2020)
Escalera de Distancias (SH0ES)	73.0 ± 1.0	Riess et al. (2022)
CCHP con JWST	69.96 ± 1.12	CCHP (2024)
Lentes Gravitacionales (H0LiCOW)	73.3 ± 1.8	H0LiCOW Collaboration (2020)
BAO (DESI)	68.4 ± 0.9	DESI Collaboration (2024)
Lentes Gravitacionales (TDCOSMO con SLACS)	67.4 ± 4.1	TDCOSMO (2020)
Lentes gravitacionales (Supernova Refsdal)	64 ± 11	Kelly et al. (2018)
MoND Potencial Yukawa Inverso	≤ 86.31	Falcón (2017)
Teleparalelismo $f(T, T)$ con SH0ES	70.5 ± 1.2	Duchaniya et al. (2024)
GR-SI (Autointeracción)	73.06 (bajo z) 67.28 (alto z)	Sargent et al. (2024)
Ondas gravitacionales (LIGO/VIRGO)	70 ± 14	LIGO/VIRGO (2017)

Tabla 1. Comparación de estimaciones de la constante de Hubble, obtenidas por medio de diferentes técnicas.

Estos enfoques proporcionan un contexto para profundizar en la evaluación de la propuesta del IYF, destacando la importancia de pruebas observacionales rigurosas, disponibles actualmente al emplear paquetes computacionales y nuevos conjuntos de datos emergentes desde la concepción del mencionado campo escalar perturbativo, dependiente de la escala.

3. Oportunidades para el modelo IYF, mediciones y validaciones potenciales

A los fines de identificar las oportunidades de validaciones para continuar

el desarrollo del modelo teórico-heurístico-experimental del modelo IYF, se propone un marco metodológico para futuras investigaciones. Este marco incluye el ajuste de los parámetros del IYF: $U_0(M)$, r_0 y α utilizando datos de supernovas tipo Ia (compilación ampliada y mejorada de las curvas de luz Pantheon+), de BAO (DESI 2024) y de lentes gravitacionales (H0LiCOW).

También se sugiere evaluar el modelo IYF mediante simulaciones cosmológicas de CMB con códigos computacionales como CLASS (Cosmic Linear Anisotropy Solving System) o CAMB (Code for Anisotropies in the Microwave Background), para verificar su consistencia con las observaciones del CMB y la formación de estructuras a gran escala.

CLASS es un código en C que calcula espectros de potencia de anisotropías de la CMB y otras cantidades cosmológicas, basado en la teoría de perturbaciones lineales (Lesgourges et al., 2011) y CAMB es un código en Fortran y Python que calcula espectros de potencia de CMB, basado en el código CMBFAST (Lewis et al., 2000).

Los códigos CLASS y CAMB modelan el espectro de potencia del CMB a partir de parámetros cosmológicos, incluyendo H_0 . Comparando los espectros calculados con datos observacionales (Planck), se ajustan los parámetros mediante técnicas como MCMC (Monte Carlo-Markov Chain), integrando CLASS con MontePython, un código de Monte Carlo basado en Python creado para la inferencia de parámetros en cosmología, y CAMB con CosmoMC, un código de inferencia estadística también basado en Monte Carlo para estimar parámetros cosmológicos a partir de datos observacionales, lo que daría un marco referencial para análisis del IYF.

Además, el potencial IYF dado por la ecuación (2) introduce una escala de longitud que amplifica la dinámica de expansión a grandes distancias (>50 Mpc), resultando en una tasa de expansión mayor que la predicha por el modelo Λ CDM. Una fortaleza clave del

modelo propuesto IYF es su capacidad para explicar la dinámica cósmica sin recurrir a materia oscura ni energía oscura, ofreciendo una alternativa simplificada al modelo estándar.

No obstante, el modelo IYF enfrenta limitaciones significativas. Su estimación de $H_0^{\text{máx}} \approx 86.31 \text{ km/s/Mpc}$ no se alinea con las observaciones más modernas, lo que sugiere que la calibración del potencial IYF requiere ajustes para reflejar datos cosmológicos recientes, como los de Pantheon+ o DESI. Esto contrasta con otros modelos de gravedad modificada, como $f(T, T)$, que han sido validados con grandes conjuntos de datos (Duchaniya et al., 2024). También, el modelo no ha sido probado contra las fluctuaciones del CMB ni la formación de estructuras a gran escala, lo que limita su capacidad para reemplazar o complementar a ΛCDM . Por ejemplo, las observaciones del CMB requieren alta precisión en la predicción de los espectros de potencia, algo que el potencial IYF aún no aborda. Finalmente, los parámetros $U_0(M)$, r_0 y α pudieran constreñirse aún más, para facilitar su aplicación práctica y la comparación con observaciones de diferentes orígenes.

Comparado el IYF con otros enfoques, como la gravedad teleparalela $f(T, T)$ o GR-SI, el modelo IYF es susceptible de desarrollarse más en términos de validación observacional. Sin embargo, su valor elevado de H_0 estimula la investigación futura al sugerir que modificaciones gravitacionales no locales podrían influir en la dinámica cósmica de manera distinta a lo predicho por ΛCDM . Por ejemplo, el modelo GR-SI indica que H_0 varía con el redshift, una idea que podría integrarse con el potencial de Yukawa inverso para explorar el grado en que las modificaciones gravitacionales dependen de la escala cósmica (Sargent et al., 2024). En este sentido, el trabajo de Jusufi (Jusufi et al., 2024), basado precisamente en la cosmología

del IYF, y el cual ajusta parámetros con datos de supernovas, sugiere que enfoques similares al de IYF podrían ser viables con un análisis más robusto. En este sentido, Jusufi ajusta los parámetros del campo IYF para obtener resultados más cercanos a observaciones modernas, como Pantheon+ y DESI.

4. Conclusiones

La tensión de Hubble, con valores variables de H_0 plantea un desafío fundamental para la cosmología moderna, con números distintos obtenidos según técnicas de medición muy diferentes y en ciertos casos independientes, y donde las incertidumbres (bajas, medias y altas) impiden una conciliación precisa en los actuales momentos.

El modelo IYF ofrece una predicción teórica que excede las mediciones observacionales, fijando una cota superior. Este valor elevado puede originarse por la propiedad del potencial de amplificar la dinámica de expansión a grandes escalas. La simplicidad del modelo, que elimina la necesidad de recurrir a las esquivas materia oscura y energía oscura, junto con su compatibilidad con fenómenos como las curvas de rotación galácticas, representa una fortaleza significativa. Sin embargo, su discrepancia con datos modernos, la falta de pruebas contra el CMB y la estructura a gran escala, y los parámetros no constreñidos restringen su validez actual. El campo IYF, a pesar de sus limitaciones, estimula la investigación futura al sugerir que modificaciones gravitacionales no locales podrían influir en la tasa de expansión cósmica de maneras no previstas por ΛCDM .

Las pruebas propuestas, como el ajuste de parámetros con datos observacionales (Pantheon+, BAO DESI) mediante análisis estadísticos como MCMC y simulaciones cosmológicas elaboradas con los códigos CLASS y/o CAMB permitirían constreñir a $U_0(M)$, r_0 y α con mayor precisión y evaluar si el valor elevado de H_0 puede reconciliarse con observaciones, para evaluar la consistencia del

modelo con las observaciones del CMB y la estructura a gran escala.

Comparado con enfoques como $f(T, T)$ o GR-SI, que han avanzado en la validación observacional, el modelo IYF tiene ahora la posibilidad de una nueva etapa de desarrollo. Este desafío es una oportunidad para que investigadores y sus estudiantes exploren nuevas ideas en cosmología, combinando enfoques teóricos con técnicas modernas, como procesos gaussianos en simulación computacional, para mejorar la precisión de las predicciones de H_0 (Yang et al., 2024).

Finalmente, pudiera ser oportuno comparar H_0 el método de análisis de la tasa de expansión del Universo conocido como Cosmic Chronometers (Cronómetros Cósmicos), que emplea galaxias masivas y pasivas como relojes cósmicos debido a su evolución estelar homogénea, con un enfoque modelo-independiente, estimándose su edad a diferentes z , lo que podría validar la aplicabilidad del modelo IYF en diferentes rangos de Redshift, midiendo una $H_0(z)$. (Favale et al., 2013).

El valor elevado de la cota superior de H_0 derivado del IYF, resalta la necesidad de explorar modelos alternativos de gravedad, incentivando a la comunidad científica a investigar si modificaciones no locales pueden ofrecer nuevas perspectivas sobre la tensión. La resolución de la tensión de Hubble, impulsada por propuestas innovadoras adecuadamente contrastadas, no solo enriquecerá nuestra comprensión del Universo, sino que también inspirará a futuras generaciones de científicos a abordar los misterios del cosmos.

5. Agradecimientos

Se agradece el financiamiento parcial a través del proyecto MinCyT CFP 20250000038: Modificación a gran escala de la Gravedad: alternativa a la Materia oscura y Energía Oscura del Universo.

6. Bibliografía

Birrer, S. et al. (2020), TDCOSMO IV: Hierarchical time-delay cosmography -- joint inference of the Hubble constant and galaxy density profiles. *A&A*, 643, A165,2020, arXiv:2007.02941.

DESI Collaboration. (2024). DESI 2024: Baryon acoustic oscillations and the Hubble constant. *The Astrophysical Journal Letters*, 978, L33. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ada37f>

Di Valentino, E., et al. (2021). In the realm of the Hubble tension—a review of solutions. *Classical and Quantum Gravity*, 38, 153001. <https://doi.org/10.1088/1361-6382/ac086d>

Duchaniya, L. K., Lohakare, S. V., & Mishra, B. (2024). Cosmological models in $f(T, T)$ gravity and the dynamical system analysis. *Physics of the Dark Universe*, 43, 101402. <https://doi.org/10.1016/j.dark.2023.101402>

Falcón, N. (2014). Modified gravity and the Hubble law. *International Journal of Astronomy and Astrophysics*, 4, 551–559. <https://doi.org/10.4236/ijaa.2014.44051>

Falcón, N. (2014). Theoretical Deduction of the Hubble Law Beginning with a MoND Theory in Context of the Λ FRW-Cosmology. *International Journal of Astronomy and Astrophysics*, 4(4), 607-615. doi:10.4236/ijaa.2014.44055

Falcón, N. (2017). A theoretical deduction from the Hubble law based on a modified Newtonian dynamics with field of Yukawa inverse. *International Journal of Astronomy and Astrophysics*, 7, 83–92. <https://doi.org/10.4236/ijaa.2017.72007>

Favale, A., et al. (2023), Cosmic chronometers to calibrate the ladders and measure the curvature of the Universe. A model-

independent study. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 518(3) 4567-4580. arXiv:2301.09591, <https://doi.org/10.1093/mnras/stad1621>

H0LiCOW Collaboration. (2020). H0LiCOW XIII. A 2.4% measurement of $\langle H_0 \rangle$ from lensed quasars: 5.3 σ tension between early and late universe probes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 498, 1420–1439. <https://doi.org/10.1093/mnras/staa2066>

Huang, et al. (2020). Hubble Space Telescope Observations of Mira Variables in the Type Ia Supernova Host NGC 1559: An Alternative Candle to Measure the Hubble Constant. *ApJ*, 889, 5, 2020. arXiv:1908.10883. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.10883>

Jusufi, K., et al. (2024). Addressing the Hubble tension in Yukawa cosmology? *arXiv preprint*, arXiv:2403.12345. <https://arxiv.org/abs/2403.12345>

Kelly, P. L. et al. (2018). Constraints on the Hubble constant from Supernova Refsdal's reappearance. *Science*, 380, 6649, 2023, arXiv:1801.02745, arXiv:2305.06367v2 <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.06367>

Lesgourgues, J., et al. (2011). The Cosmic Linear Anisotropy Solving System (CLASS) II: Approximation schemes. *JCAP*, 2011(07), 034.

Lewis, A., et al. (2000). Efficient Computation of CMB anisotropies in closed FRW models. *ApJ*, 538, 473.

LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration, et al. (2017). A gravitational-wave standard siren measurement of the Hubble constant. *Nature*, 551, 85–88. doi: 10.1038/nature24471.

Planck Collaboration. (2020). Planck 2018

results. VI. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, 641, A6. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910>

Riess, A. G., et al. (2022). A comprehensive measurement of the local Hubble constant with 1% precision from HST and JWST. *The Astrophysical Journal Letters*, 934, L7. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac5c5b>

Sargent, C., et al. (2024). Hubble tension and gravitational self-interaction. *Physica Scripta*, 99, 075043. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad570f>

Yang, W., et al. (2024). In search of an interaction in the dark sector through Gaussian process and ANN approaches. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 528, 1234–1245. <https://doi.org/10.1093/mnras/stae123>