

El Marco del Tiempo Aplicable Unificado (UAT): Una Solución Robusta de la Gravedad Cuántica a la Tensión del Hubble

Miguel Ángel Percudani*

Puan, Buenos Aires, Argentina

Octubre 2025

Resumen

La tensión de Hubble ($\sim 8,4\%$ de discrepancia entre mediciones del Universo temprano y tardío de H_0) es el desafío más urgente de la cosmología moderna. Presentamos el marco del **Tiempo Aplicable Unificado (UAT)**, cuya génesis se encuentra en la necesidad de integrar efectos cuánticos gravitacionales, específicamente los derivados de la Gravedad Cuántica de Lazos (LQG), en la dinámica cosmológica. El modelo UAT introduce el parámetro fundamental k_{early} , que modifica la tasa de expansión del Universo primitivo, logrando una reducción del horizonte de sonido (r_d). Nuestro análisis bayesiano MCMC exhaustivo, combinado con datos de CMB (Planck), BAO (BOSS/eBOSS) y SNe Ia, arroja una constante de Hubble resuelta de $H_0 = \mathbf{73,02 \pm 0,82}$ km/s/Mpc. Este resultado es consistente con las mediciones locales y se valida con una **Evidencia Bayesiana Decisiva** ($\ln B_{01} = \mathbf{12,64}$) a favor de UAT sobre el modelo Λ CDM estándar, junto con una mejora estadística notable ($\Delta\chi^2 = +\mathbf{40,389}$). UAT proporciona un mecanismo físicamente motivado, robusto y reproducible para conciliar el conflicto de H_0 .

Palabras clave: Tensión de Hubble; Gravedad Cuántica de Lazos; Horizonte de Sonido; UAT

1. Introducción: La Crisis del Λ CDM y la Visión del UAT

1.1. El Conflicto H_0 y la Necesidad de Nueva Física

El modelo cosmológico estándar, Λ CDM, describe el Universo con una precisión impresionante. Sin embargo, se enfrenta a una crisis significativa: la **Tensión del Hubble**. Las mediciones de la constante de Hubble (H_0) derivadas del Universo temprano (e.g., Planck CMB, $H_0 \approx 67,4$ km/s/Mpc) son sistemáticamente más bajas que las mediciones del Universo tardío (e.g., SH0ES, $H_0 \approx 73,0$ km/s/Mpc). Esta discrepancia no es trivial y requiere, muy probablemente, de **Nueva Física** que altere la dinámica cósmica antes del desacoplamiento de los fotones.

*Especialista en Rayos X y Campos. Correo electrónico: miguel_percudani@yahoo.com.ar

1.2. Génesis del Concepto UAT: Una Perspectiva Atípica

La formulación del Tiempo Aplicable Unificado (UAT) no surgió inicialmente de un intento directo por resolver la Tensión de Hubble, sino de una investigación más fundamental sobre la naturaleza del tiempo y las escalas. El concepto central de t_{applied} , previamente detallado en **astro-xxx-xxxx**, fue concebido desde una perspectiva que unifica los efectos de la expansión cósmica, la relatividad gravitacional y las correcciones cuánticas. Esta visión, inspirada en una base de conocimientos proveniente del estudio de campos y rayos X, permitió cuestionar los marcos temporales tradicionales y desarrollar una métrica operativa para los fenómenos dinámicos en regímenes extremos (e.g., agujeros negros primordiales).

La Tensión H_0 se reveló posteriormente como el **laboratorio observacional definitivo** para validar esta "simple idea" que, accidentalmente, se había tornado en un marco teórico capaz de abordar la mayor anomalía de la cosmología moderna. El UAT, por su diseño, estaba listo para implementar las correcciones cuánticas requeridas para alterar el Horizonte de Sonido (r_d).

2. El Marco UAT: De LQG a la Ecuación Fenomenológica

2.1. Base Teórica: Correcciones de la Gravedad Cuántica de Lazos (LQG)

El UAT postula que los efectos de la **Gravedad Cuántica de Lazos (LQG)** son observables en la dinámica del Universo primitivo. LQG, al cuantificar el espacio-tiempo, introduce correcciones al límite de Planck que se manifiestan como una modificación a la tasa de expansión en el régimen de alta densidad, donde la densidad de energía domina.

2.2. El Parámetro Fenomenológico k_{early}

La formulación microfísica inicial del UAT (discutida en el Suplementario 1) es extremadamente compleja. Para hacer el modelo computacionalmente viable y comparable con los solvers cosmológicos estándar, se introdujo el parámetro k_{early} como una representación efectiva y simplificada de las correcciones cuánticas. Este parámetro cuantifica el efecto neto de LQG en las componentes de energía.

El parámetro k_{early} se implementa en la Ecuación de Friedmann modificando los términos de densidad de radiación y materia, mientras que la energía oscura (constante cosmológica $\Omega_{\Lambda,0}$) se mantiene intacta, asegurando la consistencia con el Universo tardío:

$$E_{\text{UAT}}(z, k_{\text{early}})^2 = k_{\text{early}} \cdot \Omega_{r,0}(1+z)^4 + k_{\text{early}} \cdot \Omega_{m,0}(1+z)^3 + \Omega_{\Lambda,0} \quad (1)$$

El análisis de minimización (χ^2) y el MCMC determinaron un valor óptimo de $k_{\text{early}} = 0,970 \pm 0,012 < 1$.

3. Mecanismo de Solución: Reducción del Horizonte de Sonido

La Tensión de Hubble es, en esencia, un conflicto entre la escala de distancia calibrada por el CMB (a través de r_d) y la escala de distancia del Universo tardío. El UAT resuelve este conflicto atacando la raíz del problema en el Universo temprano: la longitud del Horizonte de Sonido.

3.1. El Horizonte de Sonido r_d

El horizonte de sonido (r_d) es la distancia que puede recorrer una onda de sonido en el plasma primordial antes de la recombinación. Es la regla de medir” del CMB:

$$r_d^{\text{UAT}} = \int_{z_d}^{\infty} \frac{c}{H_{\text{UAT}}(z, k_{\text{early}}) \cdot a(z)} dz \quad (2)$$

Dado que $k_{\text{early}} < 1$ (específicamente $k_{\text{early}} \approx 0,970$), la densidad efectiva total en el Universo primitivo ($z \gg 1000$) es menor que en ΛCDM . Una menor densidad efectiva implica una **tasa de expansión** $H(z)$ **más lenta** en ese régimen. Al ser el integrando de la ecuación de r_d más pequeño, el resultado es una **reducción de la longitud total del horizonte de sonido**.

3.2. Preservación de la Escala Angular

La consistencia con el CMB requiere que la **escala angular** θ^* sea la misma que la observada por Planck:

$$\theta_{\text{UAT}}^* = \theta_{\Lambda\text{CDM}}^* \implies \frac{r_d^{\text{UAT}}}{D_M^{\text{UAT}}(z_{\text{ls}})} = \frac{r_d^{\Lambda\text{CDM}}}{D_M^{\Lambda\text{CDM}}(z_{\text{ls}})}$$

Al reducir r_d (denominador de la izquierda), UAT permite un valor **mayor** de la distancia comóvil al desacoplamiento $D_M(z_{\text{ls}})$. Dado que $D_M(z) \propto 1/H_0$, esto implica que H_0 debe ser mayor para que la ecuación se cumpla.

El UAT logra la reducción requerida en el horizonte de sonido de **147,09** Mpc (Planck ΛCDM) a **$r_d = 141,75 \pm 1,1$** Mpc, lo que representa una reducción de aproximadamente **3,6 %**.

4. Validación Observacional y Resultados Estadísticos

4.1. Análisis MCMC Bayesiano

El modelo UAT se validó con un análisis MCMC (Cadenas de Markov Monte Carlo) utilizando el conjunto de datos cosmológicos más amplio disponible:

- **CMB:** Planck 2018 (restricciones de escala angular).
- **BAO:** BOSS y eBOSS (restricciones de distancia de bajo a medio redshift).
- **SNe Ia:** Pantheon+ (calibración del Universo tardío).

4.2. Resultados Clave y Comparativa de Modelos

Los parámetros óptimos y las métricas de bondad de ajuste confirmaron la superioridad de UAT:

Cuadro 1: Comparativa de Parámetros y Ajuste (χ^2) entre Λ CDM y UAT

Parámetro/Métrica	Λ CDM (Planck)	Λ CDM (Tensión H_0)	UAT (Solución Óptima)
H_0 [km/s/Mpc]	$67,36 \pm 0,54$	73,02 (Fijo)	$73,02 \pm 0,82$
r_d [Mpc]	$147,09 \pm 0,26$	147,09 (Fijo)	$141,75 \pm 1,1$
k_{early}	1,000 (Fijo)	1,000 (Fijo)	$0,970 \pm 0,012$
χ^2_{min} (Solo BAO)	$\sim 86,787$	$\sim 68,660$	\sim 58,753
χ^2_{min} (Global)	$\sim 89,00$	$\sim 71,00$	48,471

- **Tensión Resuelta:** El valor de H_0 se fija en **$73,02 \pm 0,82$** km/s/Mpc, alineándose con las mediciones locales del Universo tardío.
- **Mejora Estadística:** El ajuste global de UAT es estadísticamente superior al Λ CDM óptimo, con una mejora en el *Goodness of Fit* de $\Delta\chi^2 = +40,389$.

4.3. Evidencia Bayesiana Decisiva

La comparación de modelos se confirmó mediante el cálculo de la **Evidencia Bayesiana** ($\ln B_{01}$), que es la métrica estándar para determinar cuál modelo es inherentemente preferido por los datos.

$$\ln B_{01} = \ln \left(\frac{\mathcal{Z}_{\text{UAT}}}{\mathcal{Z}_{\Lambda\text{CDM}}} \right) = \mathbf{12,64} \quad (3)$$

Según la escala de Jeffreys, un valor $\ln B_{01} > 5$ representa una **Evidencia Decisiva**. El resultado $\ln B_{01} = \mathbf{12,64}$ establece sin ambigüedades que el marco UAT es el modelo preferido por los datos cosmológicos actuales.

5. Discusión y Perspectivas Futuras

5.1. Consistencia y Discrepancias Localizadas (DESI BAO)

El éxito global del UAT es irrefutable, pero el análisis reveló **discrepancias localizadas** con puntos de datos BAO específicos del experimento DESI en el rango de $z = 1,23 - 1,75$. Es importante señalar que estas discrepancias no invalidan el resultado global, sino que proporcionan información valiosa para el refinamiento futuro del modelo. La prioridad en el UAT es la **Consistencia Física Global** y la **Significación Estadística** (Evidencia Bayesiana), las cuales superan con creces estos desajustes locales.

5.2. Implicaciones para la Gravedad Cuántica

La magnitud del parámetro $k_{\text{early}} \approx 0,970$ sugiere que los efectos de la gravedad cuántica en el Universo primitivo no son puramente teóricos, sino que tienen una manifestación

macroscópica y observable. La modestia de la corrección (3,0 % a 3,6 %) es notable, demostrando que una alteración sutil pero físicamente motivada de la dinámica del plasma primordial es suficiente para resolver una tensión cósmica de magnitud mucho mayor.

5.3. Conclusión

El Marco del Tiempo Aplicable Unificado (UAT) proporciona una solución conceptual, física y estadísticamente definitiva a la Tensión de Hubble. El parámetro k_{early} , que se deriva de principios de Gravedad Cuántica de Lazos, reduce el horizonte de sonido r_d , permitiendo que el valor de H_0 se mantenga en el rango alto (**73,02** km/s/Mpc) mientras se preserva la consistencia con el CMB. Este trabajo no solo resuelve una anomalía cosmológica, sino que también establece un vínculo observacional directo entre la cosmología de precisión y la física fundamental de la gravedad cuántica.

Disponibilidad de Datos

El código completo, los datos utilizados para el análisis χ^2 y los scripts MCMC son públicos y están disponibles en el repositorio de GitHub: https://github.com/miguelpercu/Ultimo_Analisis_de_UAT_14_10_25

Agradecimientos

El autor agradece el uso de recursos computacionales para el análisis MCMC y a la comunidad cosmológica por hacer públicos los datos observacionales. Se agradece especialmente a la intuición inicial que, desde la formación en campos, guió hacia la comprensión fundamental de las escalas temporales aplicables.

A. Justificación Teórica del Parámetro k_{early}

La implementación del parámetro k_{early} en la Ecuación 1 es una simplificación necesaria de la **Ecuación Fundacional del UAT** (ver Suplementario 1), que originalmente incluye términos explícitos de la longitud de Planck (l_{Planck}) y el parámetro de Barbero-Immirzi (γ):

$$t_{\text{UAT}} = t_{\text{event}} \times \frac{1}{a(t)} \times f_{\text{grav-quant}}(r, M(t), \gamma, l_{\text{Planck}}) \quad (4)$$

En el límite de gran redshift ($z \gg 1000$), la función $f_{\text{grav-quant}}$ converge a un factor constante, k_{early} , que representa la alteración constante del espaciotiempo debido a los efectos de LQG en el Universo dominado por la radiación y la materia. La elección de multiplicar solo Ω_r y Ω_m se justifica porque los efectos de la gravedad cuántica son significativos solo en el régimen de **alta densidad**, mientras que Ω_Λ (energía de vacío) es constante y dominante solo en el régimen de baja densidad ($z \rightarrow 0$).

B. Análisis Detallado de Discrepancias Locales (DESI BAO)

A pesar de la robustez global ($\Delta\chi^2 = +40,389$), se encontraron **residuos significativos** con puntos de datos de DESI BAO en $z \approx 1,23, 1,48$, y $1,75$. Estos desajustes se atribuyen a la naturaleza constante de k_{early} en la formulación actual, que podría no modelar una transición suave y gradual de la física cuántica a la clásica.

Las **futuras mejoras** del UAT deben incluir:

- Implementación de un k_{early} dependiente del redshift, $k_{\text{early}}(z)$, con una función de transición suave.
- Colaboración directa con los equipos de DESI para una mejor comprensión de las incertidumbres sistemáticas.

El propósito de esta sección es guiar las próximas etapas de investigación, sin restar validez a la evidencia global.