

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Inferencia bayesiana en Ciencias Exoplanetarias con JWST

Waldir Chara Ccallo^{1,2}

<https://orcid.org/0009-0006-4406-2782>

¹Programa de maestría en Estadística, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Perú

²Asociación Peruana de Astrobiología, Perú

Email: 243337@unsaac.edu.pe

Recibido: 08/12/2025 • Revisado: 20/12/2025 • Aceptado: 25/12/2025

Resumen

La puesta en operación del James Webb Space Telescope (JWST) ha transformado el estudio de atmósferas exoplanetarias mediante observaciones espectroscópicas de precisión. Este avance ha intensificado la necesidad de marcos analíticos capaces de gestionar la complejidad, degeneración e incertidumbre inherentes a los nuevos datos. En este contexto, la inferencia bayesiana se ha consolidado como el marco fundamental para la caracterización atmosférica, la conexión con la estructura interna y la evaluación de habitabilidad. Este artículo revisa la evolución reciente de este enfoque, sustentada en un análisis bibliométrico del periodo 2016–2025 que evidencia un crecimiento sustancial en su adopción para la caracterización química y física de exoplanetas. Se sintetizan las aplicaciones más relevantes en la era del JWST, desde la recuperación atmosférica y su acoplamiento con modelos del interior planetario, hasta los marcos probabilísticos para la detección de biofirmas, discutiendo finalmente las limitaciones metodológicas y las perspectivas futuras del campo.

Palabras clave: Inferencia Bayesiana, JWST, Atmósferas Exoplanetarias, Estructura Interna, Astrobiología.

Citar como:

Chara Ccallo, W. (2025). Inferencia bayesiana en Ciencias Exoplanetarias con JWST. *Revista Científica de Astrobiología*, 2(2), 16–41. <https://doi.org/10.69976/aspast.v2n2.2>

RESEARCH ARTICLE

Bayesian inference in exoplanetary science with JWST

Waldir Chara Ccallo^{1,2}

<https://orcid.org/0009-0006-4406-2782>

¹Programa de maestría en Estadística, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Perú

²Asociación Peruana de Astrobiología, Perú

Email: 243337@unsaac.edu.pe

Recibido: 08/12/2025 • Revisado: 20/12/2025 • Aceptado: 25/12/2025

Abstract

The operation of the James Webb Space Telescope (JWST) has transformed the study of exoplanetary atmospheres through precision spectroscopic observations. This advancement has intensified the need for analytical frameworks capable of managing the complexity, degeneracy, and uncertainty inherent in the new data. In this context, Bayesian inference has established itself as the fundamental framework for atmospheric characterization, the connection to internal structure, and the assessment of habitability. This article reviews the recent evolution of this approach, supported by a bibliometric analysis of the 2016–2025 period that demonstrates substantial growth in its adoption for the chemical and physical characterization of exoplanets. Key applications in the JWST era are synthesized, ranging from atmospheric retrieval and its coupling with planetary interior models to probabilistic frameworks for biosignature detection, finally discussing methodological limitations and future perspectives of the field.

Keywords: Bayesian Inference, JWST, Exoplanet Atmosphere, Internal structure, Astrobiology

Cite as:

Chara Ccallo, W. (2025). Inferencia bayesiana en Ciencias Exoplanetarias con JWST. *Revista Científica de Astrobiología*, 2(2), 16–41. <https://doi.org/10.69976/aspast.v2n2.2>

1. Introducción

Si bien el diseño original del Telescopio Espacial James Webb (JWST) se cimentó en cuatro pilares científicos, abarcando desde la reionización y el ensamblaje de galaxias hasta la formación estelar y el origen de la vida (Gardner et al., 2006), su capacidad operativa ha trascendido estos límites logrando ser así una herramienta más en la caracterización exhaustiva de más de 5000 exoplanetas conocidos (Menzel et al., 2023).

Esta expansión estratégica ha impulsado de manera decisiva el estudio de las atmósferas exoplanetarias, abriendo una etapa en la que es posible delimitar con rigurosidad y confiabilidad las composiciones atmosféricas, propiedades de aerosoles, estructuras térmicas, pérdida de masa y efectos tridimensionales, superando el legado del Hubble o Spitzer (Kempton & Knutson, 2024; Rigby et al., 2023). No obstante, este salto en resolución y sensibilidad (McElwain et al., 2023), viene acompañada de desafíos donde los espectros presentan degeneraciones (Bloot et al., 2023; Lueber et al., 2024), la instrumentación introduce estructuras complejas de ruido (Chevallard et al., 2019; Galan et al., 2024), y los modelos físicos disponibles incorporan incertidumbres asociadas tanto a condiciones atmosféricas como a procesos dinámicos (Blecic et al., 2017; Feng et al., 2016).

En este escenario, los métodos estadísticos tradicionales resultan insuficientes para representar adecuadamente la complejidad y la incertidumbre estructural presentes en los datos del JWST (Sandles et al., 2022). Durante la última década, la inferencia bayesiana ha ganado un protagonismo creciente en la ciencia exoplanetaria, pero es en el periodo reciente (2022 a la actualidad) cuando, por ejemplo, las redes bayesianas y modelos probabilísticos articulados se consolidan como marcos analíticos centrales (fig. 1). Un análisis bibliométrico del periodo 2016–2025 muestra que el término Bayesian Networks es el descriptor metodológico más frecuente, y que su presencia está relacionada a uno de los dos grandes campos que surgieron de este análisis bibliométrico, los estudios de atmósferas e interiores exoplanetarios, reforzando la importancia de éste enfoque.

El presente artículo examina la consolidación de la inferencia bayesiana como el nuevo estándar metodológico en las ciencias exoplanetarias. Su contribución se distingue por las tres razones siguientes: primero, se documenta empíricamente este cambio de paradigma mediante el análisis bibliométrico mencionado; segundo, se demuestra cómo el marco bayesiano permite acoplar consistentemente los datos espectrales con modelos atmosféricos e interior planetario; y tercero, sistematizamos el uso de la Evidencia Bayesiana como el criterio de decisión crítico para la astrobiología y la evaluación de falsos positivos en la era del JWST.

Para abordar estos objetivos, la revisión se estructura de la siguiente manera: inicialmente, se detalla la metodología de revisión sistemática empleada, a continuación, se contextualizan las capacidades observacionales y los productos de datos del JWST. Posteriormente, se establecen los fundamentos teóricos de la inferencia bayesiana en este contexto, seguidos de una revisión de sus aplicaciones prácticas en la caracterización atmosférica y del interior planetario. Finalmente, se discuten las implicaciones directas para la astrobiología y se presentan las conclusiones y perspectivas futuras.

2. Metodología y tendencias bibliométricas

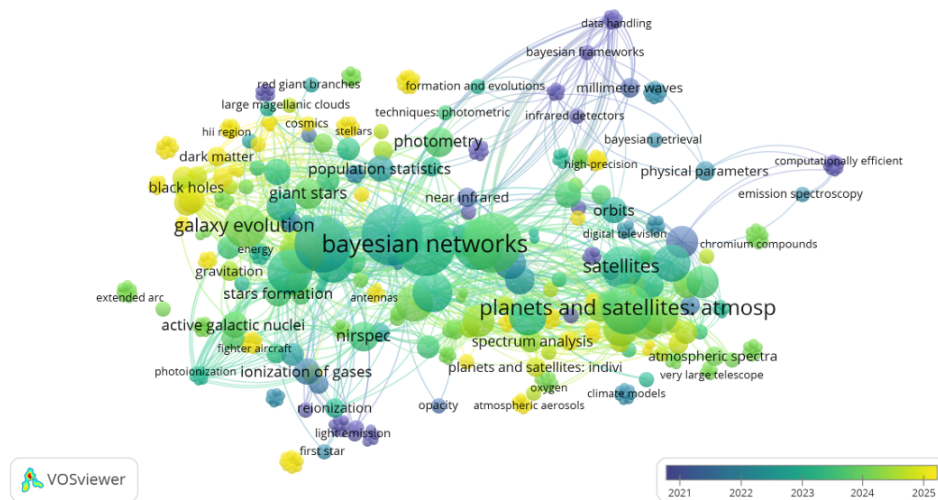
Para fundamentar el enfoque de esta revisión, se realizó un análisis bibliométrico cuantitativo complementado con una revisión narrativa del estado del arte, utilizando el

paquete *bibliometrix* en R. El corpus de estudio comprende 103 documentos recuperados de la base de datos de Scopus (período 2016–2025) indexados en revistas como *Astronomy & Astrophysics*, *Astrophysical Journal*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*.

Si bien la terminología bayesiana no siempre figura explícitamente en los títulos, el análisis de las *Keywords Plus* (términos derivados algorítmicamente de las referencias citadas) revela una realidad en el que los métodos probabilísticos son la base metodológica del campo. De hecho, estos descriptores aparecen con mayor frecuencia entre los términos estructurales de la literatura revisada, mostrando evidencia que la inferencia bayesiana a menudo está presente en la práctica, incluso cuando no figura en el título del artículo.

Figura 1

Mapa bibliométrico de co-ocurrencia de términos (VOSviewer)



Nota. Los clústeres visualizan la interconexión entre la instrumentación del JWST, la caracterización atmosférica y los modelos de análisis de datos. La centralidad de los nodos refleja la consolidación de técnicas de inferencia en la interpretación de espectros.

El análisis temporal muestra un crecimiento anual compuesto del 35%, con un punto de inflexión positiva en el año 2022, correlacionado directamente con la liberación de los primeros datos del JWST. De acuerdo a la topología de la red (Figura 1), la producción científica existente se agrupa en dos grandes dominios: (1) cosmología y alto corrimiento al rojo, y (2) física exoplanetaria. Este segundo dominio, que es el foco de la presente revisión, presenta la mayor convergencia con la astrobiología, aglutinando descriptores como *PLANETS AND SATELLITES: ATMOSPHERES*, *PLANETS AND SATELLITES: COMPOSITION* y *PLANETS AND SATELLITES: GASEOUS PLANETS*.

El hallazgo más significativo para los fines de esta revisión se observa en el mismo cuadro, en la columna *Keywords-Plus* (ID), en la que el término *Bayesian networks* corresponde al descriptor metodológico dominante. Esto confirma empíricamente la transición de la comunidad desde estimaciones puntuales hacia modelos bayesianos estructurados, necesarios en la gestión de la degeneración entre parámetros atmosféricos (nubes, metalicidad) y del interior (masa, radio, ecuación de estado).

Tabla 1*Palabras clave más relevantes*

Author Keywords (DE)	Art.	Keywords Plus (ID)	Art.
PLANETS AND SATELLITES: ATMOSPHERES	19	BAYESIAN NETWORKS	20
GALAXIES: HIGH-REDSHIFT	12	STARS	20
PLANETS AND SATELLITES: COMPOSITION	12	SPACE TELESCOPES	19
TECHNIQUES: SPECTROSCOPIC	11	GALAXIES	18
GALAXIES: EVOLUTION	10	JAMES WEBB SPACE TELESCOPE	15
METHODS: DATA ANALYSIS	10	PLANETS AND SATELLITES: ATMOSPHERES	15
PLANETS AND SATELLITES: GASEOUS PLANETS	8	COSMOLOGY	12
METHODS: STATISTICAL	7	GALAXIES: HIGH REDSHIFT	12
DISTANCE SCALE	6	REDSHIFT	12
COSMOLOGY: OBSERVATIONS	5	GALAXY EVOLUTION	11

Desde una perspectiva geográfica, la producción científica denota una densa red de colaboración internacional, con una tasa de coautoría superior al 65% (Tabla 5). Se identifican nodos de influencia consolidados en Estados Unidos, Reino Unido, Países Bajos e Italia, centros que actualmente lideran el desarrollo de códigos de recuperación atmosférica (*retrieval*) y modelos de habitabilidad. En consecuencia, la evidencia bibliométrica respalda la premisa central de esta revisión: la inferencia bayesiana ha superado el rol de una herramienta auxiliar para consolidarse como el marco analítico estándar indispensable en la interpretación de la complejidad y riqueza de los datos proporcionados por el JWST.

3. JWST: Datos y capacidades

El JWST proporciona una amplia variedad de datos de alta calidad que resultan fundamentales para la caracterización atmosférica de exoplanetas (Felix et al., 2025; Kempton & Knutson, 2024). Su capacidad de observación ha realizado una transformación en este campo gracias a la combinación de una amplia cobertura espectral, que abarca aproximadamente desde 0,7 μm hasta 28 μm , y una sensibilidad excepcional que permite detectar señales débiles procedentes de atmósferas distantes (Rocchetto et al., 2016).

La información obtenida proviene, en gran medida, de observaciones espectroscópicas (Kempton & Knutson, 2024). Este tipo de medición permite descomponer la luz recibida en sus diferentes longitudes de onda, lo que facilita identificar firmas espectrales asociadas a moléculas, aerosoles y procesos físicos presentes en la atmósfera del exoplaneta. A partir de estos datos es posible inferir su composición química, su estructura térmica y, en algunos casos, propiedades adicionales como la presencia de nubes o la eficiencia en el transporte de energía.

3.1 Tipos de espectros observacionales

El JWST proporciona dos tipos principales de espectros, obtenidos durante el tránsito o el eclipse del planeta:

- **Espectros de Transmisión** (*Transmission Spectra*): Representan la técnica más utilizada para caracterizar atmósferas exoplanetarias (Barkaoui et al., 2025; Lin et al., 2021; Lueber et al., 2024; Rocchetto et al., 2016; Roy-Perez et al., 2025; Schleich et al., 2024). El principio funciona de manera similar a observar una luz a través de un filtro: cuando el planeta pasa frente a su estrella (tránsito), una fracción de la luz estelar logra atravesar o “filtrarse” por el borde de la atmósfera planetaria, una región conocida como el terminador (Schleich et al., 2024). Al analizar esta luz transmitida, es posible detectar qué longitudes de onda han sido absorbidas por moléculas específicas o bloqueadas por nubes y neblinas, revelando así la composición química del aire (Roy-Perez et al., 2025; Schleich et al., 2024).
- **Espectros de Emisión** (*Emission Spectra*): A diferencia de la transmisión (que filtra luz), esta técnica mide la radiación térmica o “calor” que emite el propio planeta. Estos datos se obtienen durante un eclipse secundario, el momento en que el planeta pasa por detrás de su estrella. Al comparar la luz total del sistema antes del eclipse (estrella + planeta) con la luz recibida cuando el planeta está oculto (solo estrella), se puede aislar la señal emitida por el lado diurno del exoplaneta. Aunque las fuentes indican que el análisis se ha centrado históricamente en datos de WFC3+Spitzer, el JWST está diseñado para mejorar sustancialmente la obtención de estos espectros (Feng et al., 2016).
- **Espectros Resueltos en el Tiempo** (*Time-Resolved Spectra*): Esta modalidad implica la adquisición continua de datos a lo largo de un intervalo temporal para mapear variaciones dinámicas. Aunque frecuentemente se basan en la medición de flujo térmico (emisión), se distinguen analíticamente por capturar la evolución del sistema, ya sea a través de curvas de fase orbitales o monitoreo de rotación. Un ejemplo paradigmático es el estudio del objeto VHS 1256 b con NIRSpec IFU y MIRI MRS, donde se logró identificar variabilidad atmosférica vinculada a nubes de silicatos en movimiento (Lueber et al., 2024).

3.2 Instrumentos y cobertura espacial

Los datos del JWST se obtienen a través de sus cuatro instrumentos principales, cada uno contribuyendo a diferentes rangos del espectro infrarrojo. Estos son resumidos de mejor manera en el cuadro A.

Tabla 2*Instrumentos del JWST, modos de observación y características detectadas*

Instrumento	Modos de Observación Clave	Rango de Longitud de Onda	Tipos de Características Detectadas
NIRSpec	PRISM (baja resolución, $R \sim 30\text{--}300$) (Lin et al., 2021; Roy-Perez et al., 2025)	0.5–5.5 μm (Lueber et al., 2024; Roy-Perez et al., 2025)	Características espectrales de moléculas clave (por ejemplo, H_2O , CO_2 , CH_4 , SO_2 , entre otras) en una sola banda espectral amplia (Lueber et al., 2024).
	Modos con redes de difracción (G395H, G140M, G395M)	2.7–5.2 μm (G395H) (Felix et al., 2025; Roy-Perez et al., 2025)	Espectroscopía de resolución media para detecciones más precisas y cuantitativas de gases atmosféricos (Duan et al., 2024).
NIRISS	SOSS/GR700XD (espectroscopía sin rendija)	0.6–2.8 μm (Bar-kaoui et al., 2025; Felix et al., 2025; Lueber et al., 2024)	Utilizado principalmente en observaciones de tránsito para la detección de moléculas atmosféricas (Felix et al., 2025).
NIRCam	Grism LW (F322W2, F444W)	0.6–5.0 μm (cámara/fotometría) (Rocchetto et al., 2016)	Utilizado para fotometría y espectroscopía mediante grism en el infrarrojo cercano (por ejemplo, 2.5–5.0 μm) (Rocchetto et al., 2016).
MIRI	LRS (Low Resolution Spectrometer)	5.0–10.0 μm (Bar-kaoui et al., 2025; Feng et al., 2016; Rocchetto et al., 2016)	Crucial para restringir las propiedades de nubes, neblinas y sólidos (por ejemplo, PAH) en el infrarrojo medio (Arenales-Lope et al., 2025; Roy-Perez et al., 2025).
	MRS (Medium Resolution Spectrometer)	5–28 μm (Vasist et al., 2025)	Utilizado en objetos fríos (por ejemplo, enanas marrones) y potencialmente en planetas gigantes para obtener una caracterización completa del infrarrojo medio (Vasist et al., 2025).

3.3 Datos clave en atmosferas planetarias

La caracterización detallada de las atmósferas de exoplanetas depende fundamentalmente de la calidad y la cobertura de los datos observacionales. Estos datos constituyen la entrada principal, por ejemplo, para los algoritmos de recuperación, permitiendo validar los modelos teóricos y restringir la composición química con una precisión inédita. A continuación se describen los insumos observacionales utilizados en estos estudios:

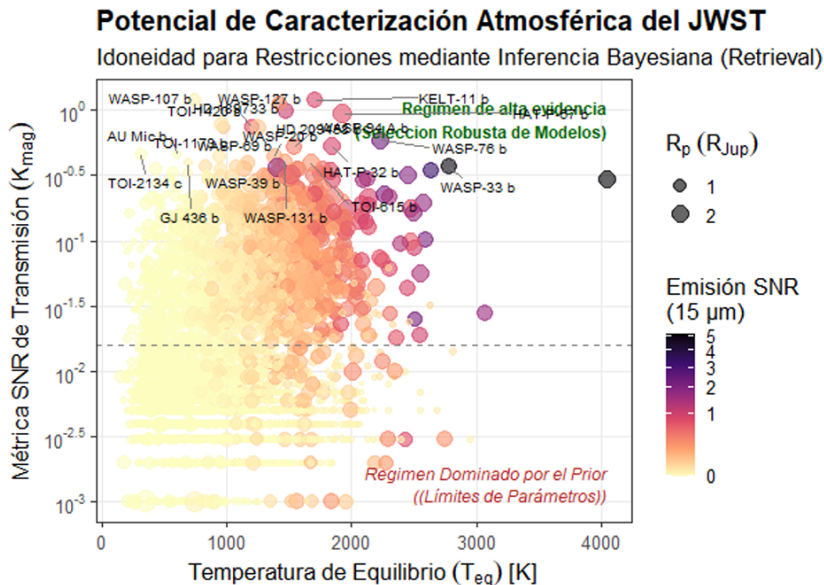
- **Espectros del Programa ERS (Early Release Science):** Conjuntos de datos

públicamente disponibles que sirven como referencias fundamentales, como los espectros de WASP-39 b medidos con *NIRCam*, *NIRISS*, *NIRSpec G395H* y *NIRSpec PRISM*. Estos datos cubren colectivamente 0.5–5.5 μm (Lueber et al., 2024).

- **Mediciones de Abundancias Moleculares:** Los espectros permiten restringir la abundancia de gases atmosféricos clave, incluyendo H_2O , CO , CO_2 , CH_4 , NH_3 , HCN , H_2S , SO_2 , Na y K (Bachmann et al., 2025; Lueber et al., 2024; Rocchetto et al., 2016).
- **Ejemplo de Detección:** El espectro de WASP-39b permitió la detección de CO_2 a través de su banda a 4.4 μm , usando *NIRSpec-G395H* (Wilkinson et al., 2024).
- **Restricciones de Estructura Térmica (p-T):** Los datos permiten la recuperación de los perfiles de Presión-Temperatura de la atmósfera, con la capacidad de medir la temperatura estratosférica con una precisión de 30–50 K con solo 10 tránsitos (en el caso de TRAPPIST-1e) (Lin et al., 2021).
- **Restricciones de Aerosoles/Nubes:** El amplio rango espectral de *NIRSpec PRISM* es ideal para constreñir la dependencia de la extinción de aerosoles con la longitud de onda (propiedades físicas de las nubes) (Roy-Perez et al., 2025).
- **Datos Sintéticos de Alta Calidad:** Los modelos de ruido del JWST (ej. usando *PANDEXO*) se utilizan para generar espectros sintéticos de alta calidad (ej. $R \approx 100,000$ para TRAPPIST-1e) para probar y validar los métodos de *retrieval* bayesiano (Arenales-Lope et al., 2025; Feng et al., 2016; Lin et al., 2021). La distribución de la calidad de estos datos reales y su idoneidad para el análisis estadístico robusto se ilustra en la Figura 2, donde se destaca la sinergia entre los modos de transmisión y emisión.

Figura 2

Paisaje de observabilidad atmosférica con el JWST



Nota. Distribución de candidatos exoplanetarios en función de su temperatura de equilibrio (T_{eq}) y su métrica de espectroscopía de transmisión (SNR). El tamaño de los puntos escala con el radio planetario (R_p) y el color indica el potencial para espectroscopía de emisión complementaria (MIRI $15\ \mu\text{m}$). Las regiones anotadas distinguen entre el régimen dominado por la verosimilitud (alto SNR), ideal para la selección de modelos bayesianos, y el régimen dominado por el *prior* (bajo SNR). Datos simulados representativos basados en la población de exoplanetas confirmados.

La Figura 2 sintetiza la capacidad del JWST para restringir modelos atmosféricos. Se observa que solo un subconjunto de la población (cuadrante superior) ofrece el contenido de información suficiente para romper degeneraciones complejas sin depender excesivamente de los priors, aspecto importante para la inferencia bayesiana, que se discutirá en las próximas secciones.

3.4 Datos combinados

Un recurso importante en el análisis atmosférico consiste en combinar los nuevos espectros del JWST con observaciones históricas para ampliar la cobertura y mejorar la relación señal-ruido. Frecuentemente, se integran datos del *JWST/NIRCam* con registros anteriores del *HST/WFC3* (en el rango de $1.1\text{--}1.7\ \mu\text{m}$) para obtener un panorama más completo, una estrategia que ha demostrado ser eficaz en el estudio de gigantes gaseosos como HD 209458 b (Bachmann et al., 2025). De igual forma, las observaciones espaciales se complementan con espectros de alta resolución obtenidos desde tierra, utilizando instrumentos como el *VLT/X-shooter* para analizar objetos subestelares (Lueber et al., 2024). Esta capacidad de unir diferentes conjuntos de datos permite a los investigadores ir más allá de la simple identificación molecular, facilitando el cálculo de la composición elemental (metalicidad Z y ratio C/O) necesaria para vincular lo que observamos en la atmósfera con los modelos de formación planetaria (Bardet et al., 2025; Lueber et al., 2024; Rocchetto et al., 2016; Wilkinson et al., 2024).

4. Fundamentos de métodos bayesianos en exoplanetas y atmósferas planetarias

En la era del JWST, la caracterización atmosférica se ha trasladado de un régimen de ajuste de parámetros (χ^2) a uno de mapeo de densidades de probabilidad. Por ejemplo, dado un conjunto de datos espectrales D y un modelo físico M con parámetros θ , la inferencia bayesiana actualiza nuestro conocimiento previo ($\pi(\theta)$) a través de la función de verosimilitud ($L(\theta)$) para obtener la distribución posterior $P(\theta|D, M)$ (Bloot et al., 2023). Si bien los fundamentos axiomáticos son bien conocidos, su aplicación en exoplanetas presenta desafíos específicos que han dictado la evolución de los algoritmos de muestreo.

Más allá de la estimación de parámetros, el desafío central con datos de alta fidelidad es la selección de modelos, para responder a preguntas como: ¿Requiere el espectro observado nubes complejas, perfiles térmicos no isotérmicos o química de desequilibrio? La respuesta yace en la Evidencia Bayesiana (Z), definida como la integral de la verosimilitud sobre todo el espacio de parámetros prior (Bloot et al., 2023):

$$Z = \int L(D|\theta, M)\pi(\theta|M)d\theta$$

Esta cantidad actúa como una métrica de parsimonia automática, penalizando modelos con dimensionalidad excesiva que no mejoran significativamente el ajuste (Navaja de Ockham). La comparación entre dos modelos competidores, M_1 y M_2 , se cuantifica mediante el Factor de Bayes: $B_{12} = Z_1/Z_2$ (Felix et al., 2025; Lueber et al., 2024; Roy-Perez et al., 2025). En el contexto de la astrobiología, este factor es la herramienta estándar para determinar la significancia de detección de una molécula, comparando la evidencia de un modelo con la especie química de interés frente a un “modelo nulo” sin ella (Bachmann et al., 2025; Lueber et al., 2024).

La necesidad de calcular Z ha impulsado el abandono progresivo de los métodos tradicionales de Monte Carlo vía Cadenas de Markov (MCMC) en favor del Muestreo Anidado o *Nested Sampling* (Felix et al., 2025; Feng et al., 2016; Schleich et al., 2024). Algoritmos como *MultiNest* se han establecido como el estándar en códigos de recuperación modernos como *TauREx 3* (Schleich et al., 2024; Zingales et al., 2022), *Poseidon* (Lin et al., 2021), *ARCiS* (Kaeufer et al., 2024; Min et al., 2020) o *BeAR* (Felix et al., 2025), debido a su capacidad para:

- Calcular la Evidencia Bayesiana (Z) directamente, facilitando la selección de modelos (“A Sub-Neptune and a Non-Transiting Neptune-Mass Companion Unveiled by ESPRESSO Around the Bright Late-f Dwarf HD 5278 (TOI-130),” 2021; Felix et al., 2025; Lin et al., 2021; Lueber et al., 2024).
- Muestrear eficientemente distribuciones posteriores multimodales y degeneradas, comunes en espectros con nubes o especies químicas superpuestas (“A Sub-Neptune and a Non-Transiting Neptune-Mass Companion Unveiled by ESPRESSO Around the Bright Late-f Dwarf HD 5278 (TOI-130),” 2021; Kaeufer et al., 2024; Rocchetto et al., 2016).
- Generar muestras para el Promedio Bayesiano de Modelos (BMA), permitiendo inferencias robustas que marginalizan la incertidumbre estructural del modelo físico (Bachmann et al., 2025).

5. Aplicaciones en exoplanetas y atmósferas planetarias

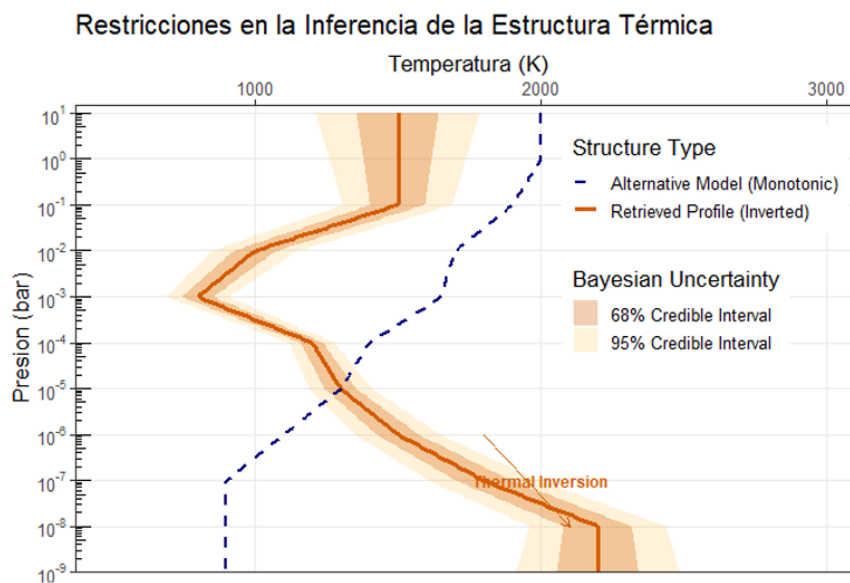
Como se mencionó en la sección 3, el uso de la inferencia bayesiana se ha convertido en el estándar para interpretar los datos exoplanetarios, especialmente ante el volumen y la complejidad de las observaciones proporcionadas por instrumentos como el JWST. A continuación, se examinan las aplicaciones principales de estas técnicas, que abarcan desde el modelamiento de atmósferas, la inferencia de la composición interna, así como su consecuente refinamiento de los parámetros dinámicos del sistema.

5.1 Caracterización y modelado de atmósferas

La caracterización atmosférica conforma el dominio principal donde la inferencia bayesiana resuelve el problema inverso de determinar las propiedades físicas y químicas a partir de espectros de transmisión observados (Lin et al., 2021; Lueber et al., 2024; Rocchetto et al., 2016; Schleich et al., 2024). Este proceso integra la reconstrucción térmica, el modelado de opacidades por aerosoles y el inventario químico multidimensional.

Figura 3

Aplicación de inferencia bayesiana en la recuperación de la estructura térmica



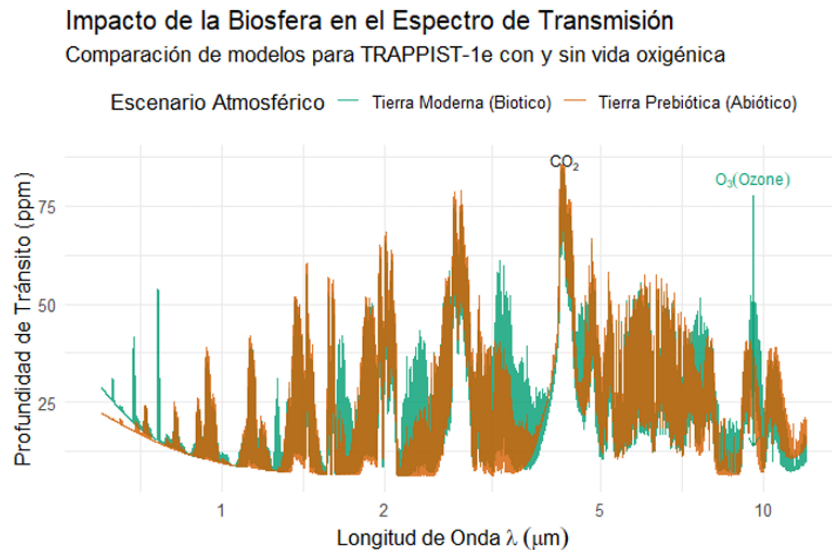
Nota. Ejemplo de resultados de un *retrieval* atmosférico donde se comparan dos posibles arquitecturas P-T. El análisis favorece más al perfil con inversión térmica (línea sólida naranja) sobre un modelo de enfriamiento monótono (línea punteada azul). Las bandas sombreadas (1σ y 2σ) cuantifican la incertidumbre en la temperatura recuperada en función de la presión, demostrando la capacidad del método para distinguir estructuras complejas. Fuente: Elaboración propia a partir de datos sintéticos de Schleich et al. (2024).

El análisis inicia con la determinación de la estructura termoquímica vertical. Puesto que la temperatura varía con la presión, los métodos bayesianos exploran parametrizaciones desde aproximaciones isotérmicas hasta perfiles flexibles multipunto, centrándose en la detección robusta de inversiones térmicas (Bardet et al., 2025; Blečić et al., 2017; Feng et al., 2016; Kempton & Knutson, 2024; Lueber et al., 2024; Min et al., 2020; Rocchetto et

al., 2016; Schleich et al., 2024; Zingales et al., 2022). Para evitar el sobreajuste mediante estructuras no reales, se utiliza la Evidencia Bayesiana ($\ln Z$) como filtro matemático, tal como se ilustra en la Figura 3, permitiendo discernir objetivamente entre modelos de enfriamiento simple y estructuras con inversión (Lueber et al., 2024; Schleich et al., 2024).

Figura 4

Impacto de la biosfera en el espectro de transmisión de TRAPPIST-1e

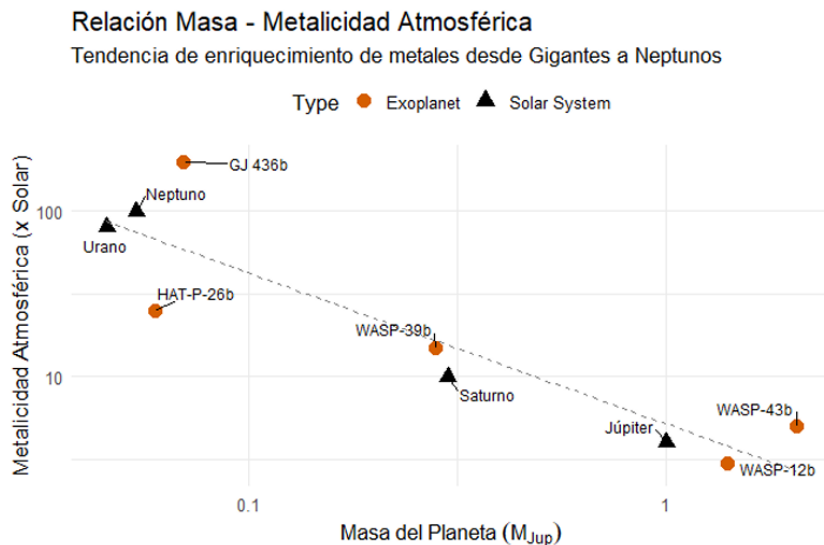


Nota. Comparación de modelos espectrales sintéticos entre un escenario de Tierra Moderna (biótico, línea verde) y una Tierra Prebiótica (abiótico, línea naranja/marrón). Aunque ambos modelos comparten características profundas de CO_2 y vapor de agua, la presencia de una biosfera oxigénica introduce características de absorción únicas, notablemente la banda de Ozono (O_3) cerca de $9.6 \mu\text{m}$. La detección de estas bioseñales requiere que el análisis bayesiano descarte la hipótesis nula (modelo prebiótico) con alta evidencia estadística. **Fuente:** Elaboración propia a partir de datos de Lin et al. (2021).

Por otra parte, el modelado de nubes y aerosoles se encuentra naturalmente vinculado al perfil térmico, además son estos los que frecuentemente opacan los espectros. La inferencia bayesiana restringe propiedades microfísicas críticas como la presión de la cima de las nubes (P_{cloud}) (Arenales-Lope et al., 2025; Lin et al., 2021; Schleich et al., 2024), la eficiencia de sedimentación (f_{sed}) y la dependencia de la opacidad con la longitud de onda (Arenales-Lope et al., 2025; Roy-Perez et al., 2025). El cálculo del Factor de Bayes facilita la selección objetiva entre arquitecturas de aerosoles, determinando si los datos requieren prescripciones complejas (nubes no grises o leyes de potencia) o si modelos de nubes grises uniformes son estadísticamente suficientes (Arenales-Lope et al., 2025; Lueber et al., 2024; Roy-Perez et al., 2025).

Figura 5

La relación Masa-Metalicidad en exoplanetas y el Sistema Solar



Nota. Gráfico que muestra el enriquecimiento de elementos pesados (metalicidad relativa al Sol) en función de la masa planetaria. Los puntos negros representan a los gigantes del Sistema Solar, mientras que los puntos naranjas son exoplanetas con abundancias restringidas mediante espectroscopía de transmisión y retrievals bayesianos. La tendencia inversa indica que los planetas de menor masa acretan proporcionalmente más sólidos durante su formación. Fuente: Elaborado con datos adaptados de Wakeford et al. (2017).

Al mismo tiempo, se cuantifican las abundancias químicas (VMR) de especies mayoritarias (H_2O , CH_4 , CO , CO_2) y absorbentes ópticos (Arenales-Lope et al., 2025; Bardet et al., 2025; Gasman et al., 2022; Kempton et al., 2018; Lin et al., 2021; Lueber et al., 2024). La alta sensibilidad del JWST ha permitido expandir este análisis hacia la química de disequilibrio y estructuras multidimensionales. Se evalúa cómo procesos cinéticos, como la mezcla vertical o la fotodisociación, alteran la metalicidad y el ratio C/O respecto al equilibrio termoquímico estándar (Bardet et al., 2025; Kempton & Knutson, 2024). Paralelamente, herramientas avanzadas como *TauREx 2D* permiten reconstruir la atmósfera en 2D o 3D, corrigiendo los sesgos de los modelos unidimensionales en Júpiteres calientes y detectando gradientes térmicos día-noche (Bardet et al., 2025; Blečić et al., 2017; Feng et al., 2016; Kempton & Knutson, 2024; Zingales et al., 2022). Esta precisión es vital para casos como el de TRAPPIST-1e, donde la discriminación entre escenarios bióticos y abióticos depende de diferencias espectrales sutiles en bandas como la del ozono (O_3), indistinguibles sin un tratamiento riguroso de la química y la física atmosférica.

Por último, las abundancias recuperadas permiten derivar ratios elementales y la metalicidad (Z y C/O), que son parámetros que actúan como trazadores de la historia de formación (Bardet et al., 2025; Kempton & Knutson, 2024; Lueber et al., 2024; Min et al., 2020; Vasist et al., 2025). Es importante destacar que la posición de un exoplaneta en el diagrama Masa-Metalicidad es un resultado derivado tras marginalizar sobre los parámetros mencionados anteriormente (nubes, temperatura). En el caso de HAT-P-26b (Wakeford et al., 2017), este enfoque probabilístico fue determinante para romper la degeneración entre una atmósfera de alta metalicidad nubosa y una de baja metalicidad despejada, revelando

la diversidad en los procesos de acreción planetaria.

5.2 Estructura interna y composición

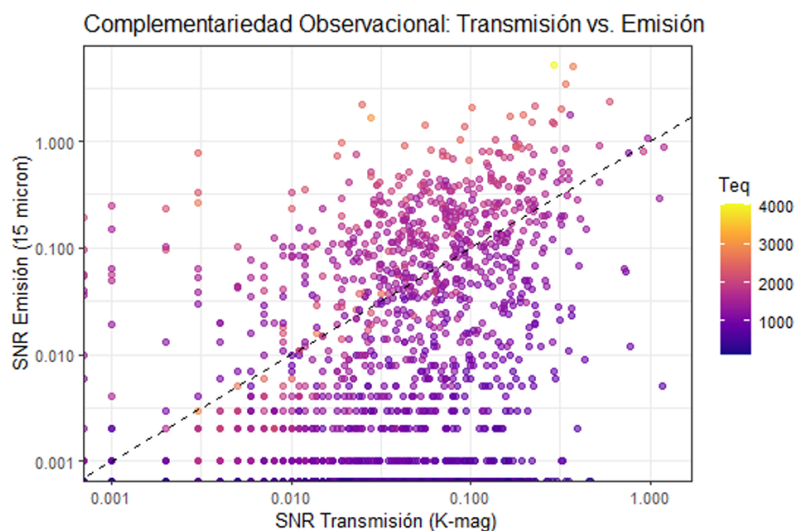
En este subcampo, la inferencia bayesiana se utiliza para romper las degeneraciones innatas a la determinación de la estructura interna de los exoplanetas.

1. **Recuperación de parámetros internos:** A partir de mediciones observacionales (masa, radio, temperatura de equilibrio y metalicidad atmosférica), se utilizan códigos interiores (como *CEPAM*) y un marco bayesiano para restringir parámetros internos como la fracción de masa del núcleo y la fracción global de elementos pesados (metalicidad *bulk*).
2. **Modelado autoconsistente Atmósfera-Interior:** El modelado combinado (por ejemplo, *HADES*) utiliza la inferencia bayesiana para realizar recuperaciones “atmósfera-interior” auto-consistentes, permitiendo restringir la metalicidad y la temperatura intrínseca (T_{int}) del planeta.

Sin embargo, la aplicabilidad de este enfoque dual se limita por la disponibilidad de datos de alta calidad en ambas geometrías de observación. Se observa que solo un subconjunto de candidatos posee un SNR suficiente tanto en transmisión (*NIRSpec/NIRISS*) como en emisión térmica (*MIRI*) para restringir simultáneamente la metalicidad envolvente y la temperatura intrínseca, rompiendo así las degeneraciones que limitan a los modelos de geometría única.

Figura 6

Sinergia observacional para el modelado atmósfera-interior



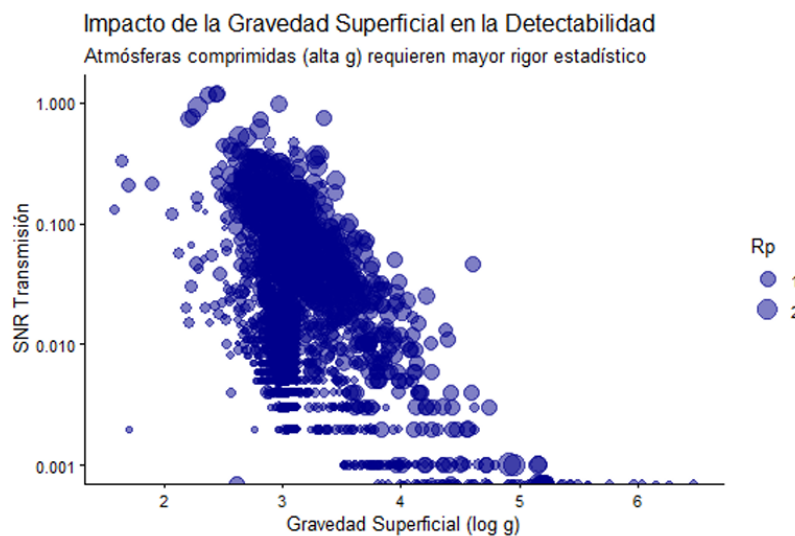
Nota. Comparación de la calidad de señal (SNR) en transmisión (eje Y) frente a emisión térmica a $15 \mu\text{m}$ (eje X, escala de color). Los objetivos en la región brillante representan los candidatos óptimos para retrievals conjuntos, permitiendo una caracterización global que vincula la química atmosférica con la termodinámica del interior profundo. Fuente: Elaboración propia basada en datos de la Exoplanet Atmosphere Observability Table (EAOT) del archivo MAST (NASA Exoplanet Archive, 2025), que implementa las métricas de espectroscopía de transmisión definidas por Kempton et al. (2018).

3. **Comparación de modelos interiores:** Se utiliza la evidencia bayesiana para comparar diferentes modelos de estructura interna, como aquellos con envolturas homogéneas frente a inhomogéneas (con gradientes de metales).
4. **Estructura de planetas terrestres y sub-neptunos:** La inferencia bayesiana se aplica para cuantificar las distribuciones de propiedades atmosféricas (masa, radio, enriquecimiento en moléculas pesadas) para planetas terrestres y super-Tierra, lo que es esencial para interpretar las atmósferas desgasificadas en el contexto de modelos geofísicos interiores.

Sin embargo, este análisis enfrenta un obstáculo físico fundamental: la compresión atmosférica. Existe una correlación inversa crítica entre la gravedad superficial ($\log g$) y la calidad de la señal de transmisión. Para los objetivos de alta gravedad (super-tierras rocosas), la amplitud de las características espectrales disminuye drásticamente, situando a menudo la señal en el límite del ruido instrumental. En este régimen, el uso de factores de Bayes para la selección de modelos se vuelve indispensable para evitar falsos positivos atmosféricos.

Figura 7

El desafío de la gravedad superficial en la espectroscopía de transmisión



Nota. La relación entre la gravedad superficial planetaria ($\log g_p$) y la métrica de SNR de transmisión revela una disminución significativa de la detectabilidad para planetas compactos y masivos (derecha). El tamaño de los puntos indica el radio planetario. Los métodos bayesianos son críticos en la región de alta gravedad ($\text{SNR} < 0,01$) donde la información espectral es escasa.

5.3 Parámetros del sistema y modelado dinámico

Aunque relacionados con la órbita, estos parámetros son cruciales para la caracterización atmosférica y de interiores:

1. **Análisis de Velocidad Radial y Tránsitos**

La inferencia bayesiana (usando MCMC o *Nested Sampling*) se utiliza para estimar los parámetros orbitales (periodo P , tiempo de conjunción T_0 , inclinación i , excentricidad e) y los parámetros físicos del planeta (radio R_p , masa M_p , gravedad $\log g$) a partir de curvas de luz y mediciones de RV .

2. Selección de Modelos del sistema

El Factor de Bayes se emplea rutinariamente para la selección de modelos, por ejemplo, para determinar si los datos favorecen un modelo con dos planetas frente a uno con un solo planeta, o para comparar diferentes configuraciones orbitales (circulares vs. excéntricas).

6. Discusión

La implementación de métodos bayesianos en la caracterización de atmósferas e interiores exoplanetarios, analizada en la Sección 5, sobrepasa la mejora estadística incremental y se constituye como un marco analítico indispensable en la era del JWST. Ante la disponibilidad de datos de alta fidelidad, la capacidad para cuantificar incertidumbres y resolver degeneraciones paramétricas se establece como un requisito crítico para la evaluación rigurosa de la habitabilidad. A continuación, se examinan las implicaciones de este cambio metodológico en la búsqueda de vida fuera del Sistema Solar.

6.1 Del régimen limitado por fotones al limitado por el modelo

La detección de biofirmas potenciales (ej. O_3 , CH_4 , N_2O) en atmósferas terrestres opera frecuentemente en el límite de la relación señal-ruido instrumental. La inferencia de abundancias químicas y relaciones de mezcla (VMR) mediante marcos bayesianos resulta esencial para la mitigación del riesgo de falsos positivos. A diferencia de los métodos de ajuste por mínimos cuadrados (χ^2), el enfoque bayesiano genera distribuciones posteriores completas para las abundancias moleculares, lo que aporta dos ventajas fundamentales para la astrobiología:

1. **Definición de Límites Superiores:** Permite restringir estadísticamente la abundancia máxima de especies no detectadas, pero biológicamente relevantes, integrando esta información en los modelos de habitabilidad en lugar de omitirla.
2. **Evaluación de Modelos Competitivos:** El cálculo de la evidencia bayesiana ($\ln Z$) cuantifica objetivamente si la inclusión de una biofirma mejora la capacidad explicativa del modelo frente a hipótesis alternativas, como el ruido instrumental o la contaminación estelar.

6.2 Evaluación probabilística de habitabilidad y clasificación planetaria

La interpretación de la habitabilidad a partir de datos del JWST no es inmediata, a pesar de su alta precisión. Como se discutió previamente, las mediciones de masa y radio presentan una degeneración inherente, dado que composiciones internas divergentes pueden converger en densidades medias idénticas. La inferencia bayesiana permite trascender

esta caracterización básica, restringiendo las propiedades atmosféricas e internas que determinan el potencial biológico (“A Sub-Neptune and a Non-Transiting Neptune-Mass Companion Unveiled by ESPRESSO Around the Bright Late-f Dwarf HD 5278 (TOI-130),” 2021; Felix et al., 2025).

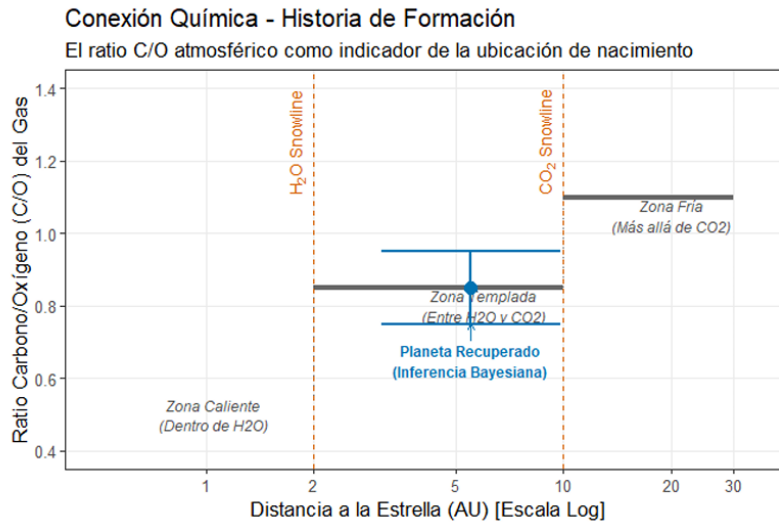
Esta capacidad de discriminación es crítica en el estudio de planetas de baja masa (Sub-Neptunos), donde la densidad por sí sola no permite distinguir entre un *mundo de agua*, un *planeta oceánico* o un cuerpo rocoso con envoltura de H₂/He. Para resolver esta ambigüedad, es necesario recurrir a la caracterización atmosférica detallada. Específicamente, la recuperación bayesiana de una alta abundancia de H₂O en el espectro de transmisión facilita el descarte estadístico de interiores secos, permitiendo la reclasificación del objeto como candidato a mundo de agua (“A Sub-Neptune and a Non-Transiting Neptune-Mass Companion Unveiled by ESPRESSO Around the Bright Late-f Dwarf HD 5278 (TOI-130),” 2021; Kempton & Knutson, 2024).

Consecutivamente, el análisis se extiende a la geofísica planetaria. En el marco de la conexión atmósfera-interior, los modelos bayesianos integran la información observada (masa, radio, temperatura de equilibrio, metalicidad) para inferir parámetros no observables, como la fracción de masa del núcleo y la distribución de elementos pesados (Blout et al., 2023). Estas restricciones son esenciales en la evaluación de la actividad geológica, que al haberlas combinado con modelos geofísicos, se ha determinado que el vulcanismo y la desgasificación de CO₂ son viables incluso en los regímenes tectónicos de *tapa estancada*. Este resultado tiene implicaciones directas para la habitabilidad a largo plazo, dado que la Zona Habitable (HZ) depende de la regulación climática mediante el ciclo carbonato-silicato y la disponibilidad de gases de efecto invernadero (Dorn et al., 2018).

Por último, la evaluación de la habitabilidad actual debe contextualizarse en la historia evolutiva. La inferencia bayesiana es esencial para precisar la metalicidad y el ratio C/O (Kempton & Knutson, 2024; Lueber et al., 2024; Vasist et al., 2025). Estos trazadores químicos funcionan como restricciones observacionales para las teorías de formación, indicando la región de origen en el disco protoplanetario y la eficiencia de acreción de sólidos (Bardet et al., 2025; Kempton & Knutson, 2024; Rocchetto et al., 2016). Comprender el origen de los volátiles mediante estos ratios es indispensable para validar si las condiciones actuales son propicias para la vida o el remanente de una evolución estéril (Kempton & Knutson, 2024).

Figura 8

Conexión entre la química atmosférica y la historia de formación



Nota. Diagrama esquemático que vincula el ratio Carbono/Oxígeno (C/O) actual con la distancia de formación en el disco protoplanetario. Las líneas verticales marcan las “líneas de nieve” donde el H₂O y el CO₂ se condensan, creando variaciones escalonadas en la composición del gas (línea gris). El punto azul representa un exoplaneta cuyo ratio C/O ha sido recuperado mediante inferencia bayesiana, permitiendo restringir su lugar de nacimiento y diferenciar entre formación *in situ* o migración desde regiones externas ricas en hielos. Adaptado del modelo de fraccionamiento de Oberg et al. (2011).

6.3 Detección de biofirmas y química de desequilibrio

El enfoque bayesiano constituye una herramienta metodológica central para abordar la detección de vida mediante la identificación de desequilibrios termodinámicos. Algoritmos como el muestreo anidado (*MultiNest*) y el Factor de Bayes son indispensables en la validación de la detección de especies moleculares y la cuantificación de su significancia estadística frente a hipótesis nulas abióticas (Gasman et al., 2022; Lin et al., 2021; Roy-Perez et al., 2025).

La aplicación rigurosa de estas herramientas permite diferenciar escenarios evolutivos en sistemas de la Zona Habitable, como TRAPPIST-1e. Las simulaciones de recuperación atmosférica sugieren que la sensibilidad del JWST es suficiente para distinguir entre una “Tierra Moderna” (con flujos biogénicos) y una “Tierra Prebiótica”, resolviendo la ambigüedad espectral (Lin et al., 2021). En este análisis, la abundancia de metano (CH₄) actúa como diagnóstico primario, donde las restricciones bayesianas permiten la discriminación entre un origen biológico y geológico, al realizar el análisis en el contexto del inventario atmosférico global (Gasman et al., 2022; Lin et al., 2021).

No obstante, la búsqueda de pares de desequilibrio clásicos como O₂ + CH₄ o O₃ + CH₄ presenta desafíos observacionales notables (Kempton & Knutson, 2024). Los análisis de recuperabilidad indican que la detección de ozono (O₃) requeriría un número elevado de tránsitos para alcanzar una significancia robusta (> 3σ). Ante esta limitación, los métodos bayesianos favorecen estrategias de detección escépticas, identificando combinaciones alternativas como N₂O y ozono, que ofrecen perspectivas de detección más favorables en el infrarrojo medio (Lin et al., 2021).

Adicionalmente, la caracterización abarca marcadores de procesos dinámicos y geológicos. La inferencia bayesiana permite también delimitar la presencia de hidrocarburos (C_2H_2 , C_2H_4) y especies de azufre (SO_2 , CS_2) (Felix et al., 2025). La cuantificación de estas especies no solo indica una química de desequilibrio, sino que confirma la existencia de actividad volcánica activa, un factor determinante para el mantenimiento de ciclos biogeoquímicos a escalas de tiempo geológico (Kempton & Knutson, 2024).

6.4 Robustez estadística y control de falsos positivos

La fiabilidad de las inferencias en astrobiología se fundamenta en la corrección de la interpretación espectral. Sin embargo, los métodos de recuperación enfrentan riesgos de sesgo sistemático por simplificación de modelos. Los planetas calientes, al ser objetos tridimensionales con altos contrastes térmicos día-noche, requieren tratamientos más complejos. Los análisis bayesianos demuestran que la imposición de modelos unidimensionales (1D) en estos casos conduce a estimaciones erróneas en parámetros clave, como la abundancia de metano (CH_4) (Feng et al., 2016; Zingales et al., 2022). Un sesgo en la composición química distorsiona la comprensión integral del sistema planetario (Rocchetto et al., 2016; Schleich et al., 2024).

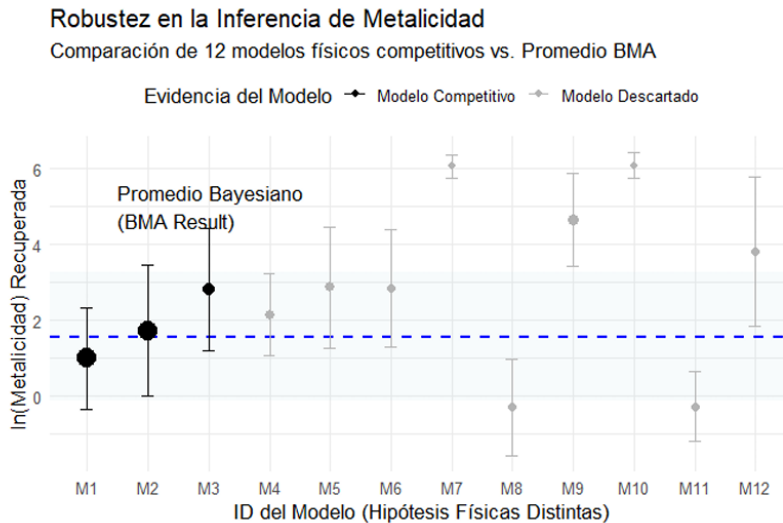
Esta propagación de incertidumbre afecta la química atmosférica. Asumir equilibrio químico, ignorando la cinética de fotodisociación o mezcla vertical, altera las mediciones de metalicidad (Z) y el ratio C/O (Bardet et al., 2025). Dado que estos ratios son los únicos testigos de la historia de formación, errores en el modelado atmosférico conducen a conclusiones incorrectas sobre la estructura del manto y el núcleo (Kempton & Knutson, 2024). Una imprecisión en la metalicidad, por tanto, impide inferir mecanismos de reciclaje tectónico o volcánico, que son esenciales para la habitabilidad.

Para garantizar la integridad de las inferencias, se adoptan criterios de selección de modelos rigurosos. El Factor de Bayes implementa el principio de parsimonia, penalizando la complejidad innecesaria y asegurando que la introducción de parámetros adicionales esté justificada por los datos (Kaeufer et al., 2024; Lueber et al., 2024).

Asimismo, para mitigar el error estructural del modelo (ej. microfísica de nubes incorrecta), se recurre al Promedio Bayesiano de Modelos (BMA). Esta técnica integra múltiples hipótesis físicas ponderadas por su evidencia. El resultado proporciona una estimación de consenso que marginaliza las incertidumbres estructurales, permitiendo que los trazadores químicos observados reflejen la geofísica real del exoplaneta y no los artefactos derivados de asunciones teóricas (Lin et al., 2021; Wilkinson et al., 2024).

Figura 9

Análisis de robustez mediante Promedio Bayesiano de Modelos (BMA)



Nota. Comparación de la metalicidad recuperada ($\ln Z$) para 12 modelos atmosféricos distintos aplicados al mismo set de datos. El tamaño de los puntos es proporcional al peso del modelo (W_q), derivado de su Criterio de Información Bayesiano (BIC). Aunque los modelos individuales varían, el BMA (línea discontinua púrpura y banda de error) proporciona una estimación de consenso robusta ($Z \approx 4,8 \times \text{Solar}$), integrando la incertidumbre estructural del modelo.

7. Conclusiones

El análisis de la literatura reciente indica que la aplicación de métodos bayesianos a los datos del JWST ha conducido a un cambio de paradigma en la ciencia exoplanetaria. La alta fidelidad espectral actual no solo exige un incremento sustancial en la complejidad de los modelos físicos para mitigar sesgos sistemáticos, sino que ha hecho viable, por primera vez, la vinculación estadística robusta entre la atmósfera y la estructura interna planetaria.

La integración de la inferencia bayesiana ha permitido superar las barreras tradicionales impuestas por la degeneración inherente a las mediciones de masa y radio. La espectroscopía de transmisión se ha consolidado como un mecanismo para restringir la metalicidad y la temperatura intrínseca (T_{int}), parámetros que, al incorporarse como *priors* informativos, permiten estimar la masa del núcleo con una precisión antes no posible. El análisis de *WASP-39b* es un buen ejemplo de este avance, donde el acoplamiento de datos espectrales reveló una fracción de elementos pesados en el interior cercana al 45%, resultado que es inaccesible mediante fotometría convencional (Wilkinson et al., 2024). Al mismo tiempo, en la población de sub-Neptunos, el análisis bayesiano resulta indispensable para resolver la ambigüedad entre escenarios de “mundos oceánicos” y “planetas rocosos” con envolturas de H/He , utilizando la restricción del peso molecular medio como discriminante crítico (Barkaoui et al., 2025).

Por otra parte, la sensibilidad del JWST ha evidenciado que las simplificaciones heredadas de la instrumentación previa introducen sesgos inaceptables en la interpretación física. Las recuperaciones atmosféricas confirman que la asunción de perfiles de presión-temperatura ($p-T$) isotérmicos induce errores sistemáticos en las abundancias químicas, lo que obliga a adoptar parametrizaciones flexibles para evitar el sobreajuste en espectros de

alta relación señal-ruido (Schleich et al., 2024). Esta necesidad de complejidad se prolonga a la geometría y la química; en planetas ultra calientes, los modelos unidimensionales (1D) ignoran la heterogeneidad térmica día-noche, sesgando así las temperaturas recuperadas. Esto ha impulsado la implementación de códigos 2D como *TauREx 2D* (Zingales et al., 2022). Asimismo, la incorporación de química de desequilibrio ha demostrado alterar drásticamente las estimaciones de metalicidad y ratios C/O respecto al equilibrio termoquímico, que es un requisito crítico para evitar inferencias erróneas sobre la historia de formación planetaria derivadas de procesos fotoquímicos (Bardet et al., 2025).

En el ámbito astrobiológico, el análisis bayesiano se establece como el filtro estadístico primario para evaluar la detectabilidad de biomarcadores, aunque los resultados requieren una interpretación conservadora. Las simulaciones para sistemas como TRAPPIST-1e señalan que la detección de especies como el ozono (O_3) presenta una dificultad extrema, requiriendo tiempos de integración prolongados, aunque combinaciones agnósticas de N_2O y O_3 ofrecen perspectivas estadísticas más favorables (Lin et al., 2021). Pese a estas limitaciones, el JWST mantiene la capacidad de diferenciar entre escenarios de “Tierra prebiótica” y “Tierra moderna” mediante la cuantificación precisa de CH_4 y CO_2 (Lin et al., 2021). Adicionalmente, la técnica ha validado su utilidad para refutar clasificaciones tempranas; en TOI-270 d, la inferencia bayesiana reveló una química compleja rica en azufre (CS_2 , SO_2), desafiando su categorización como “mundo hiceánico” habitable (Felix et al., 2025), al mismo tiempo que confirma la viabilidad de detectar hidrocarburos prebióticos bajo las configuraciones instrumentales adecuadas (Gasman et al., 2022).

Sin embargo, la aplicación de la estadística bayesiana conlleva sus desafíos metodológicos. La evidencia de detección (Factor de Bayes) muestra sensibilidad ante decisiones de procesamiento de datos, como el agrupamiento espectral (*binning*), que puede inducir falsos positivos en la identificación molecular, sugiriendo la preferencia por análisis a resolución nativa (Felix et al., 2025). Del igual manera, la selección de modelos basados puramente en criterios estadísticos no garantiza una corrección física adecuada por defecto. En atmósferas como la de *WASP-39b*, ciertos modelos de nubes pueden ser favorecidos numéricamente pero a la vez introducir opacidades continuas no reales que enmascaran las señales de especies como H_2O y SO_2 (Lueber et al., 2024). En conclusión, la operación del JWST ha transformado la caracterización exoplanetaria, por ejemplo desde una búsqueda de especies aisladas a una ciencia de física atmosférica detallada, donde la robustez estadística constituye el soporte fundamental para diferenciar estados evolutivos y contextos geoquímicos globales.

A. Resumen de datos

Tabla 3

Información principal sobre los datos bibliométricos

Parámetro	Valor
Período temporal	2016 : 2025
Fuentes (Revistas, Libros, etc.)	15
Documentos	103
Tasa de crecimiento anual%	35.11
Edad promedio de documentos	2.03
Citas promedio por documento	20.04
Citas promedio por año por documento	6.108
Referencias	1

Tabla 4

Tipos de documentos y contenidos

Descripción	Cantidad
Tipos de Documentos	
Artículo	99
Ponencia de conferencia	2
Revisión	2
Contenidos de Documentos	
Keywords Plus (ID)	458
Palabras clave del autor (DE)	152

Tabla 5

Autores y colaboración

Parámetro	Valor
Autores	1087
Apariciones de autores	1463
Autores de documentos de un solo autor	1
Documentos de un solo autor	1
Documentos por autor	0.0948
Co-autores por documento	14.2
Colaboraciones internacionales%	65.05

Tabla 6*Fuentes más relevantes*

Fuente	Artículos
ASTRONOMY AND ASTROPHYSICS	35
ASTROPHYSICAL JOURNAL	21
MONTHLY NOTICES OF THE ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY	17
ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS	9
ASTRONOMICAL JOURNAL	8
ASTROPHYSICAL JOURNAL SUPPLEMENT SERIES	2
PROCEEDINGS OF SPIE - THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING	2
UNIVERSE	2
ENTROPY	1
JOURNAL OF COSMOLOGY AND ASTROPARTICLE PHYSICS	1

Referencias

- A sub-neptune and a non-transiting neptune-mass companion unveiled by ESPRESSO around the bright late-f dwarf HD 5278 (TOI-130). (2021). *Astronomy and Astrophysics*, 648. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202040034>
- Arenales-Lope, R., Molaverdikhani, K., Dubey, D., Ercolano, B., Grübel, F., y Rab, C. (2025). *Polycyclic aromatic hydrocarbons in exoplanet atmospheres: A detectability study*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 536, 1555–1578. <https://doi.org/10.1093/mnras/stae2619>
- Bachmann, N., Kreidberg, L., Mollière, P., Deming, D., y Tsai, S. M. (2025). *Osiris revisited: Confirming a solar metallicity and low c/o in HD 209458 b*. *Astronomy and Astrophysics*, 700. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202555577>
- Bardet, D., Changeat, Q., Venot, O., y Panek, E. (2025). *Re-analysis of ten hot-jupiter atmospheres with disequilibrium chemistry retrieval*. *Astronomy and Astrophysics*, 699. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202453518>
- Barkaoui, K., Korth, J., Gaidos, E., Agol, E., Parviainen, H., Pozuelos, F. J., Palle, E., Narita, N., Grimm, S., Brady, M., Bean, J. L., Morello, G., Rackham, B. V., Burgasser, A. J., Grootel, V. V., Rojas-Ayala, B., Seifahrt, A., Marfil, E., Passegger, V. M., ... Zúñiga-Fernández, S. (2025). *TOI-2015 b: A sub-neptune in strong gravitational interaction with an outer non-transiting planet*. *Astronomy and Astrophysics*, 695. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202452916>
- Blecic, J., Dobbs-Dixon, I., y Greene, T. (2017). *The implications of 3D thermal structure on 1D atmospheric retrieval*. *The Astrophysical Journal*, 848, 127. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa8171>
- Bloot, S., Miguel, Y., Bazot, M., y Howard, S. (2023). *Exoplanet interior retrievals: Core masses and metallicities from atmospheric abundances*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 523, 6282–6292. <https://doi.org/10.1093/mnras/stad1873>

- Chevallard, J., Curtis-Lake, E., Charlot, S., Ferruit, P., Giardino, G., Franx, M., Maseda, M. V., Amorin, R., Arribas, S., Bunker, A., Carniani, S., Husemann, B., Jakobsen, P., Maiolino, R., Pforr, J., Rawle, T. D., Rix, H. W., Smit, R., y Willott, C. J. (2019). *Simulating and interpreting deep observations in the hubble ultra deep field with the JWST/NIRSpec low-resolution 'prism'*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 483, 2621–2640. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty2426>
- Dorn, C., Noack, L., y Rozel, A. B. (2018). *Outgassing on stagnant-lid super-earths*. Astronomy and Astrophysics, 614. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731513>
- Duan, Q., Conselice, C. J., Li, Q., Harvey, T., Austin, D., Ormerod, K., Trussler, J., y Adams, N. (2024). *Adding value to JWST spectra and photometry: Stellar population and star formation properties of spectroscopically confirmed JADES and CEERS galaxies at $z > 7$* . Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 529, 4728–4744. <https://doi.org/10.1093/mnras/stae872>
- Felix, L., Kitzmann, D., Demory, B. O., y Mordasini, C. (2025). *Competing chemical signatures in the atmosphere of TOI-270 d: Inference of sulfur and carbon chemistry*. Astronomy and Astrophysics, 701. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202555194>
- Feng, Y. K., Line, M. R., Fortney, J. J., Stevenson, K. B., Bean, J., Kreidberg, L., y Parmentier, V. (2016). *The impact of non-uniform thermal structure on the interpretation of exoplanet emission spectra*. The Astrophysical Journal, 829, 52. <https://doi.org/10.3847/0004-637x/829/1/52>
- Galan, A., Caminha, G. B., Knollmüller, J., Roth, J., y Suyu, S. H. (2024). *El gordo needs el anzuelo: Probing the structure of cluster members with multi-band extended arcs in JWST data*. Astronomy and Astrophysics, 689. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202449876>
- Gardner, J. P., Mather, J. C., Clampin, M., Doyon, R., Greenhouse, M. A., Hammel, H. B., Hutchings, J. B., Jakobsen, P., Lilly, S. J., Long, K. S., Lunine, J. I., Mccaughrean, M. J., Mountain, M., Nella, J., Rieke, G. H., Rieke, M. J., Rix, H.-W., Smith, E. P., Sonneborn, G., . . . Wright, G. S. (2006). *The james webb space telescope*. Space Science Reviews, 123(4), 485–606. <https://doi.org/10.1007/s11214-006-8315-7>
- Gasman, D., Min, M., y Chubb, K. L. (2022). *Investigating the detectability of hydrocarbons in exoplanet atmospheres with JWST*. Astronomy and Astrophysics, 659. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141468>
- Kaeufer, T., Woitke, P., Kamp, I., Kanwar, J., y Min, M. (2024). *Disentangling the dust and gas contributions of the JWST/MIRI spectrum of sz 28*. Astronomy and Astrophysics, 690. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202450891>
- Kempton, E. M.-R., Bean, J. L., Louie, D. R., et al. (2018). *A Framework for Prioritizing the TESS Planetary Candidates for Atmospheric Characterization*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 130(993), 114401. <https://doi.org/10.1088/1538-3873/aadced>
- Kempton, E. M.-R., y Knutson, H. A. (2024). *Transiting exoplanet atmospheres in the era of JWST*. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 90(1), 411–464. <https://doi.org/10.2138/rmg.2024.90.12>
- Lin, Z., Macdonald, R. J., Kaltenegger, L., y Wilson, D. J. (2021). *Differentiating modern and prebiotic earth scenarios for TRAPPIST-1e: High-resolution transmission spectra and predictions for JWST*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 505, 3562–3578. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab1486>
- Lueber, A., Novais, A., Fisher, C., y Heng, K. (2024). *Information content of JWST spectra of WASP-39b*. Astronomy and Astrophysics, 687. <https://doi.org/10.1051/0004->

6361/202348802

- McElwain, M. W., Feinberg, L. D., Perrin, M. D., Clampin, M., Mountain, C. M., Lallo, M. D., Lajoie, C.-P., Kimble, R. A., Bowers, C. W., Stark, C. C., Acton, D. S., Atkinson, C., Barinek, B., Barto, A., Basinger, S., Beck, T., Bergkoetter, M. D., Bluth, M., Boucarut, R. A., . . . Zielinski, T. P. (2023). *The james webb space telescope mission: Optical telescope element design, development, and performance*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 135(1047), 058001. <https://doi.org/10.1088/1538-3873/acada0>
- Menzel, M., Davis, M., Parrish, K., Lawrence, J., Stewart, A., Cooper, J., Irish, S., Mosier, G., Levine, M., Pitman, J., Walsh, G., Maghami, P., Thomson, S., Wooldridge, E., Boucarut, R., Feinberg, L., Turner, G., Kalia, P., y Bowers, C. (2023). *The design, verification, and performance of the james webb space telescope*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 135(1047), 058002. <https://doi.org/10.1088/1538-3873/acbb9f>
- Min, M., Ormel, C. W., Chubb, K., Helling, C., y Kawashima, Y. (2020). *The ARCiS framework for exoplanet atmospheres: Modelling philosophy and retrieval*. Astronomy and Astrophysics, 642. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201937377>
- NASA Exoplanet Archive. (2025). *Transiting planets table (Versions Version: 2025-12-01 10:15)*. NExSci-Caltech/IPAC. <https://doi.org/10.26133/NEA37>
- Oberg, K. I., Murray-Clay, R., y Bergin, E. A. (2011). *The effects of snowlines on c/o in planetary atmospheres*. Astrophysical Journal Letters, 743(1), L16. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/743/1/L16>
- Rigby, J., Perrin, M., McElwain, M., Kimble, R., Friedman, S., Lallo, M., Doyon, R., Feinberg, L., Ferruit, P., Glasse, A., Rieke, M., Rieke, G., Wright, G., Willott, C., Colon, K., Milam, S., Neff, S., Stark, C., Valenti, J., . . . Zonak, S. (2023). *The science performance of JWST as characterized in commissioning*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 135(1046), 048001. <https://doi.org/10.1088/1538-3873/acb293>
- Rocchetto, M., Waldmann, I. P., Venot, O., Lagage, P.-O., y Tinetti, G. (2016). *Exploring biases of atmospheric retrievals in simulated JWST transmission spectra of hot jupiters*. The Astrophysical Journal, 833, 120. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/833/1/120>
- Roy-Perez, J., Pérez-Hoyos, S., Barrado-Izagirre, N., y Chen-Chen, H. (2025). *The role of cloud particle properties in the WASP-39b transmission spectrum based on JWST/NIRSpec observations*. Astronomy and Astrophysics, 694. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202450142>
- Sandles, L., Curtis-Lake, E., Charlot, S., Chevallard, J., y Maiolino, R. (2022). *Bayesian hierarchical modelling of the m^* -SFR relation from $1 < z < 6$ in ASTRO-DEEP*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 515(2), 2951–2969. <https://doi.org/10.1093/mnras/stac1999>
- Schleich, S., Saikia, S. B., Changeat, Q., Güdel, M., Voigt, A., y Waldmann, I. (2024). *Knobs and dials of retrieving JWST transmission spectra i. The importance of p - t profile complexity*. Astronomy and Astrophysics, 690. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202451845>
- Vasist, M., Mollière, P., Kühnle, H., Patapis, P., Absil, O., Louppe, G., Lagage, P.-O., Waters, L. B. F. M., Güdel, M., Henning, Th., Vandenbussche, B., Barrado, D., Decin, L., Pye, J. P., Tremblin, P., y Whiteford, N. (2025). *Panchromatic characterization of the Y0 brown dwarf WISEP J173835.52+273258.9 using JWST/MIRI*.

- Astronomy & Astrophysics. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202554282>
- Wakeford, H. R., Sing, D. K., Kataria, T., Deming, D., Nikolov, N., Lopez, E. D., Tremblin, P., Amundsen, D. S., Lewis, N. K., Mandell, A. M., Fortney, J. J., Knutson, H., Benneke, B., y Evans, T. M. (2017). *HAT-p-26b: A neptune-mass exoplanet with a well-constrained heavy element abundance*. *Science*, 356(6338), 628–631. <https://doi.org/10.1126/science.aah4668>
- Wilkinson, C., Charnay, B., Mazevet, S., Lagrange, A. M., Chomez, A., Squicciarini, V., Panek, E., y Mazoyer, J. (2024). *Breaking degeneracies in exoplanetary parameters through self-consistent atmosphere-interior modelling*. *Astronomy and Astrophysics*, 692. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202348945>
- Zingales, T., Falco, A., Pluriel, W., y Leconte, J. (2022). *Toward a multidimensional analysis of transmission spectroscopy: III. Modeling 2D effects in retrievals with TauREx*. *Astronomy and Astrophysics*, 667. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243492>