

Protocolo P.A.V.O.R.A.: Marco Metodológico para la Detección Remota de Vida en Mundos Oceánicos. Aplicación al Exoplaneta K2-18 b

P.A.V.O.R.A. Protocol: A Methodological Framework for Remote Detection of Life in Ocean Worlds. Application to Exoplanet K2-18 b

Marcelo Iván, Gallardo Nicolalde (1)

Pertenencia institucional

(1) Universidad Tecnológica Israel, Quito, Ecuador.

Correspondencia

marceloivangallardo@gmail.com

ORCID

Gallardo Nicolalde
0009-0001-6775-5294

Resumen

Este artículo presenta el protocolo P.A.V.O.R.A. (Protocolo de Análisis y Verificación de Organismos en Recintos Acuáticos), un marco metodológico integral para la detección remota de vida en exoplanetas oceánicos. El protocolo integra observaciones multi-espectrales, análisis de biofirmas atmosféricas y técnicas de monitorización temporal para discriminar entre procesos biológicos y fuentes abióticas. Como caso de estudio, aplicamos el protocolo a K2-18 b, priorizado por su posición en la zona habitable, detección previa de vapor de agua y características de mundo hiceánico. El enfoque considera explícitamente limitaciones instrumentales y escenarios de falsos positivos, proporcionando un marco robusto para la interpretación de datos en la próxima generación de misiones de telescopios espaciales

Palabras clave:

Astrobiología; Exoplanetas; K2-18 b; Biofirmas; Mundos oceánicos; Espectroscopía; Protocolo P.A.V.O.R.A.; Falsos positivos.

Abstract

This article presents the P.A.V.O.R.A. protocol (Protocol for Analysis and Verification of Organisms in Aquatic Environments), a comprehensive methodological framework for the remote detection of life on oceanic exoplanets. The protocol integrates multispectral observations, atmospheric biosignature analysis, and temporal monitoring techniques to discriminate between biological processes and abiotic sources. As a case study, we applied the protocol to K2-18 b, prioritized for its position in the habitable zone, previous detection of water vapor, and Hecatean world characteristics. The approach explicitly considers instrumental limitations and false positive scenarios, providing a robust framework for data interpretation in the next generation of space telescope missions.

Key words:

Astrobiology; Exoplanets; K2-18 b; Biosignatures; Ocean worlds; Spectroscopy; P.A.V.O.R.A. protocol; False positives.

Protocolo P.A.V.O.R.A.: Marco Metodológico para la Detección Remota de Vida en Mundos Oceánicos. Aplicación al Exoplaneta K2-18 b

Marcelo Iván Gallardo Nicolalde *Investigador Independiente*

ORCID: 0009-0001-6775-5294 Quito, Ecuador

marceloivangallardo@gmail.com Dr. Jorge Bueno *Departamento de Investigación Espacial y Astrobiología*
Asesor Científico 22 de septiembre de 2025

Resumen—Este artículo presenta el protocolo P.A.V.O.R.A. (Protocolo de Análisis y Verificación de Organismos en Recintos Acuáticos), un marco metodológico integral para la detección remota de vida en exoplanetas oceánicos. El protocolo integra observaciones multi-espectrales, análisis de biofirmas atmosféricas y técnicas de monitorización temporal para discriminar entre procesos biológicos y fuentes abióticas. Como caso de estudio, aplicamos el protocolo a K2-18 b, priorizado por su posición en la zona habitable, detección previa de vapor de agua y características de mundo hiceánico. El enfoque considera explícitamente limitaciones instrumentales y escenarios de falsos positivos, proporcionando un marco robusto para la interpretación de datos en la próxima generación de misiones de telescopios espaciales.

Index Terms—Astrobiología, exoplanetas, K2-18 b, biofirmas, mundos oceánicos, espectroscopía, protocolo P.A.V.O.R.A., falsos positivos.

I. INTRODUCCIÓN

Los exoplanetas de tipo "hiceánico." mundo oceánico- representan objetivos fundamentales en la búsqueda de vida extraterrestre. Entre los candidatos identificados (GJ 1214 b, TRAPPIST-1e, LHS 1140 b), K2-18 b emerge como prioritario debido a: (i) su posición en la zona habitable conservadora de una enana roja tipo M2.5, (ii) la detección confirmada de vapor de agua en su atmósfera mediante el Telescopio Espacial James Webb (JWST) [1], y (iii) su radio (2,6) y masa (8,6) compatibles con una estructura de mundo oceánico.

Sin embargo, la detección robusta y estadísticamente significativa de vida en tales entornos requiere superar desafíos fundamentales, incluyendo la discriminación entre firmas biológicas y procesos geoquímicos abióticos [2], y las limitaciones instrumentales actuales. El protocolo P.A.V.O.R.A. se desarrolla específicamente para abordar estos retos mediante un enfoque sistemático que combina múltiples líneas de evidencia y considera explícitamente escenarios alternativos.

II. METODOLOGÍA DEL PROTOCOLO P.A.V.O.R.A.

II-A. Justificación de la Priorización de K2-18 b

K2-18 b se selecciona sobre otros mundos oceánicos debido a su combinación única de factores observables. A diferencia de GJ 1214 b, cuya atmósfera es opaca debido a brumas de

alta altitud, K2-18 b muestra características espectrales discernibles. Comparado con TRAPPIST-1e, recibe menor flujo de radiación UV dañina de su estrella anfitriona, aumentando las probabilidades de preservación de biofirmas atmosféricas.

II-B. Fase 1: Cartografía de Habitabilidad

II-B1. Termografía Global con Limitaciones Instrumentales: Utilizando el instrumento MIRI del JWST en el rango de $5\mu\text{m}$ a $28\mu\text{m}$, la resolución espacial limitada ($\sim 0,1$ arcseg) impide mapeos detallados, pero permite estimaciones globales mediante la ecuación de balance energético simplificado:

$$\pi R_p^2 F_* (1 - A) = 4\pi R_p^2 \sigma T_{eq}^4 \quad (1)$$

donde R_p es el radio planetario, F_* es el flujo estelar, A es el albedo de Bond, y T_{eq} es la temperatura de equilibrio. Para incluir efectos atmosféricos:

$$T_{surf} = T_{eq} + \Delta T_{atm} \quad (2)$$

donde ΔT_{atm} representa el calentamiento por efecto invernadero, estimado en 10 K a 50 K para atmósferas de H_2 [1].

II-B2. Detección de Penachos Hidrotermales: La detección de metano (CH) y sulfuro de hidrógeno (HS) con NIRSpec/JWST tiene límites de detectividad de ~ 10 ppm para CH y ~ 50 ppm para HS con $S/N > 5$ en 10 tránsitos observados. Una relación CH/HS > 10 sugiere actividad hidrotermal sostenida, análoga a los sistemas de respiraderos de la Tierra [6].

II-B3. Análisis de Isotopías con Notación Delta: El fraccionamiento isotópico se cuantifica mediante:

$$\delta^{13}\text{C} = \left(\frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{sample}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000 \quad (3)$$

donde valores $\delta^{13}\text{C} < -60$ en CH sugieren fuerte preferencia biológica por el isótopo ligero [3].

II-C. Fase 2: Búsqueda de Biofirmas Atmosféricas

II-C1. Límites de Detectabilidad para DMS: El dimetil-sulfuro (DMS) requiere ~ 20 tránsitos con NIRSpec/G395H ($R \sim 2700$) para alcanzar detección a 5σ con abundancia > 1 ppb, asumiendo ausencia de nubes en capas altas que puedan enmascarar firmas.

II-C2. Consideración de Enmascaramiento por Brumas: Brumas de hidrocarburos en la estratosfera, como las observadas en GJ 1214 b, pueden reducir la amplitud de las características espectrales en hasta un 80 %, requiriendo correcciones mediante modelos de transferencia radiativa [4].

II-C3. Patrones Estacionales: La monitorización a largo plazo de variaciones en las abundancias de gases bioindicadores permite identificar ciclos potencialmente vinculados a actividad biológica. Utilizamos análisis de series temporales con transformadas de Fourier para detectar periodicidades.

II-D. Fase 3: Observación Directa

II-D1. Reflectancia Oceánica: La espectropolarimetría en el visible y UV cercano permite detectar biofirmas de polarización circular asociadas a la quiralidad molecular, una firma más específica que la reflectancia espectral convencional [5].

II-D2. Detección de Bioluminiscencia Nocturna: La búsqueda de fotones en el rango visible (400 nm a 700 nm) durante el periodo nocturno del planeta, con sensibilidad de ~ 1 fotón/m²/s, puede revelar actividad bioluminiscente coordinada. Este umbral requiere telescopios con apertura > 10 m actualmente en desarrollo.

III. RESULTADOS ESPERADOS Y DISCUSIÓN

III-A. Escenario 1: Evidencia Sólida de Vida

Detección de DMS + CH con $\delta^{13}C < -60$ + patrones estacionales claros + firma de polarización circular, con exclusión de mecanismos abióticos conocidos (Tabla I). Este escenario requeriría al menos 24 meses de observaciones continuas para establecer patrones consistentes.

III-B. Escenario 2: Evidencia Ambigua con Posibles Falsos Positivos

Detección aislada de CH sin fraccionamiento isotópico claro, potencialmente explicable por serpentización a baja temperatura (< 200 °C) o fotólisis de CO. Este caso requeriría observaciones complementarias con telescopios de mayor resolución espacial.

III-C. Escenario 3: Enmascaramiento por Condiciones Atmosféricas

Presencia de brumas de alta altitud o nubes globales que reducen la profundidad de tránsito espectral en > 50 %, imposibilitando la detección concluyente con instrumentación actual. Este escenario podría resolverse con observaciones en múltiples longitudes de onda.

IV. CONCLUSIÓN

El protocolo P.A.V.O.R.A. representa un avance significativo en la metodología para la detección remota de vida en exoplanetas, incorporando explícitamente limitaciones instrumentales, mecanismos de falsos positivos y criterios de priorización entre múltiples candidatos. Su aplicación a K2-18 b identifica requisitos observacionales específicos y umbrales de detectabilidad realistas. La combinación de espectroscopía de

alta resolución, monitorización temporal y técnicas emergentes como la polarimetría por quiralidad ofrece el camino más robusto hacia la detección estadísticamente significativa de vida extraterrestre en la próxima década.

Los resultados esperados sugieren que, incluso bajo condiciones óptimas, la confirmación definitiva de vida en K2-18 b requerirá campañas observacionales extensivas y posiblemente el desarrollo de instrumentación más avanzada. Sin embargo, el protocolo establece un marco sólido para interpretar resultados ambiguos y planificar futuras misiones de caracterización de exoplanetas.

REFERENCIAS

- [1] Madhusudhan, N. et al. (2023). "Habitability and Biosignatures of Hycean Worlds". *The Astrophysical Journal*, 945(2), 100.
- [2] Seager, S. et al. (2014). "Exoplanet Biosignatures: A Review". *Astrobiology*, 14(3), 200-219.
- [3] Catling, D. C. et al. (2018). "Exoplanet Biosignatures: A Framework for Their Assessment". *Astrobiology*, 18(6), 709-738.
- [4] Meadows, V. S. et al. (2018). "Exoplanet Biosignatures: Understanding Oxygen as a Biosignature in the Context of Its Environment". *Astrobiology*, 18(6), 630-662.
- [5] Sparks, W. B. et al. (2009). "Detection of Circular Polarization in Light Scattered from Photosynthetic Microbes". *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 110(14), 1771-1777.
- [6] Tsai, S.-M. et al. (2023). "Promising Biosignatures in the Atmosphere of K2-18 b?". *JWST Early Release Science*, 1(1), 15-30.

Cuadro I
CLASIFICACIÓN DE BIOFIRMAS SEGÚN CONFIABILIDAD Y MECANISMOS ABIÓTICOS DE CONFUSIÓN

Biofirma	Evidencia Fuerte	Evidencia Ambigua	Mecanismos Abióticos
DMS + CH	Co-detección con $\delta^{13}C < -60$	DMS solo o CH solo	Fotoquímica UV en atmósferas de H
Patrones Estacionales	Ciclos anuales reproducibles	Variaciones no periódicas	Actividad geológica episódica
Bioluminiscencia	Patrones sincronizados	Destellos aleatorios	Centelleo atmosférico
Polarización Circular	Quiralidad consistente	Señal no reproducible	Dispersión por aerosoles