

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Ojos alienígenas en la Tierra: lo que la visión de los insectos puede enseñar a la astrobiología

Nicolas Ayala-Tovar¹ 

¹ Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Email: nayalat@unal.edu.co

Recibido: 17-03-2026 • Revisado: 08-06-2026 • Aceptado: 22-06-2026

Resumen

La exploración de exoplanetas presenta desafíos tanto únicos como interesantes para la identificación de biofirmas específicamente en espectros lumínicos que el ojo humano no detecta. Este artículo explora cómo el ojo compuesto de los insectos ofrece un modelo biológico modelable y replicable para la exploración espacial, gracias a los avances en visión por computadora y redes neuronales. La idea es procesar la información proveniente de los espectros de luz ultravioleta y polarizada, para traducirlos en algoritmos de navegación útiles para los rovers. Se propone que la arquitectura visual de los insectos no solo sería una herramienta práctica, sino un marco conceptual para entender cómo formas de vida extraterrestre podrían percibir su entorno bajo diferentes condiciones que afecten el espectro de luz, ya sea radiaciones estelares extremas, atmósferas densas o la oscuridad absoluta.

Palabras clave: Visión por computadora, biomimesis, exoplanetas, biofirmas

Citar como:

Ayala-Tovar, N. (2026). Ojos alienígenas en la Tierra: lo que la visión de los insectos puede enseñar a la astrobiología. *Revista Científica de Astrobiología*, 3(1), 31–42. <https://doi.org/10.69976/aspast.v3n1.4>

RESEARCH ARTICLE

Alien eyes on Earth: what insect vision can teach astrobiology

Nicolas Ayala-Tovar¹ 

¹ Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

Email: nyalat@unal.edu.co

Received: 17-03-2026 • Revised: 08-06-2026 • Accepted: 22-06-2026

Abstract

The exploration of exoplanets presents both unique and interesting challenges for identifying biosignatures specifically in light spectra that the human eye cannot detect. This article explores how the compound eye of insects offers a modelable and replicable biological model for space exploration, thanks to advances in computer vision and neural networks. This approach proposes processing information from ultraviolet and polarized light spectra and translate it into useful navigation algorithms for rovers. It is proposed that the visual architecture of insects would not only be a practical tool, but also a conceptual framework for understanding how extraterrestrial life forms might perceive their environment under different conditions that affect the light spectrum, whether extreme stellar radiation, dense atmospheres, or absolute darkness.

Keywords: Computer vision, biomimicry, exoplanets, biosignatures

Cite:

Ayala-Tovar, N. (2026). Alien eyes on Earth: what insect vision can teach astrobiology *Revista Científica de Astrobiología*, 3(1), 31–42. <https://doi.org/10.69976/aspast.v3n1.4>

1. Introducción

La pregunta de si existe o no vida fuera de la Tierra ha constituido uno de los problemas científicos más profundos de la historia de la ciencia. En las últimas décadas, con el descubrimiento de miles de exoplanetas ha transformado nuestra visión del universo, abriendo nuevas posibilidades para investigar la habitabilidad planetaria (Seager et al., 2005). Sin embargo, detectar vida en otros mundos implica desafíos técnicos y conceptuales robustos. Uno de los más importantes es la identificación de biofirmas, es decir, señales que puedan indicar actividad biológica.

Las biofirmas pueden manifestarse de diversas formas, incluyendo composiciones atmosféricas con presencia de ciertos compuestos químicos, estructuras moleculares complejas asociadas a actividad metabólica y patrones espectrales en la reflectancia de la superficie del planeta (Catling et al., 2018). Por ejemplo, la presencia simultánea de oxígeno y metano en una atmósfera constituye una de las biofirmas más estudiadas, debido a que estos compuestos tienden a reaccionar entre sí y desaparecer con relativa rapidez si no existe una fuente que los reponga constantemente (Krissansen-Totton et al., 2016; Lovelock, 1965). En la Tierra, gran parte de esta reposición es consecuencia de la actividad biológica. De igual manera, ciertos pigmentos fotosintéticos modifican la forma en que la superficie refleja la luz. La vegetación terrestre, por ejemplo, produce una señal característica conocida como "red edge", un incremento abrupto de la reflectancia en el infrarrojo cercano que puede detectarse mediante observaciones remotas (Seager, 2014). Otras posibles biofirmas incluyen moléculas orgánicas complejas, patrones químicos incompatibles con el equilibrio geológico esperado y variaciones estacionales en la composición atmosférica que podrían indicar actividad metabólica a escala planetaria.

Sin embargo, la detección de estas señales depende en gran medida de los instrumentos utilizados y de las longitudes de onda que somos capaces de observar. Como consecuencia, algunas biofirmas potenciales podrían pasar desapercibidas si se manifiestan fuera de las regiones del espectro electromagnético tradicionalmente empleadas en la exploración planetaria. A modo de ejemplo, el ojo humano percibe únicamente cierta franja del espectro electromagnético, aproximadamente entre los 400 y 700 nanómetros. No obstante, numerosos organismos terrestres han evolucionado sistemas sensoriales capaces de detectar y ver una franja más amplia del espectro. Entre estos organismos tenemos a los insectos, que destacan por poseer sistemas visuales extraordinariamente sofisticados (Briscoe & Chittka, 2001). Muchos insectos pueden detectar la luz ultravioleta, patrones polarizados en el cielo e interpretar contrastes espectrales complejos (Chittka & Menzel, 1992).

En este contexto, surge la siguiente pregunta ¿Podrían los sistemas visuales de los insectos servir como modelo para diseñar nuevas herramientas de exploración espacial? Este artículo explorará cómo la morfología y fisiología de la visión de los insectos puede inspirar tecnologías de percepción para la búsqueda de biofirmas y al mismo tiempo, ofrecer un marco conceptual para imaginar cómo otras formas de vida podrían percibir su entorno en diferentes mundos.

2. Cuerpo

2.1. La visión más allá del ojo humano

Como se mencionó anteriormente, la visión humana se limita a una franja del espectro electromagnético. Esta limitación no es universal dentro del reino animal, ya que diversos

organismos, desde aves, crustáceos, peces y reptiles son capaces de percibir luz ultravioleta, el infrarrojo y distinguir la polarización de diversas longitudes de onda (Cronin & Bok, 2016). Estas capacidades sensoriales especializadas han evolucionado en numerosos grupos animales como resultado de millones de años de selección natural, permitiéndoles detectar señales relevantes para la navegación, la búsqueda de alimento, la comunicación y la supervivencia en ambientes complejos (Cronin et al., 2014).

En astrobiología, este hecho tiene implicaciones profundas. La diversidad de sistemas visuales presentes en la Tierra demuestra que no existe una única forma de percibir el entorno. Si la vida evoluciona en planetas sometidos a condiciones estelares, atmosféricas o geológicas diferentes a las terrestres, es plausible que tanto sus sistemas sensoriales como las señales biológicas que producen se desarrollen en regiones del espectro electromagnético distintas de aquellas a las que estamos acostumbrados. De hecho, algunos modelos sugieren que la fotosíntesis extraterrestre podría generar biofirmas espectrales muy diferentes a la denominada “red edge” característica de la vegetación terrestre (Kiang et al., 2007). Esto implica que restringir la exploración de exoplanetas a instrumentos diseñados únicamente desde una perspectiva humana podría limitar nuestra capacidad para reconocer formas de vida que se manifiesten mediante señales ópticas diferentes a las observadas en la Tierra.

2.2. Los insectos, organismos expertos en detectar señales invisibles

Los insectos constituyen uno de los grupos de animales más diversos del planeta y han conquistado una gran variedad de nichos ecológicos, en parte a la variedad de adaptaciones sensoriales que han evolucionado (Grimaldi & Engel, 2005). Además de sistemas visuales altamente especializados, muchos insectos poseen receptores químicos capaces de detectar feromonas a grandes distancias, mecanorreceptores sensibles a vibraciones del sustrato y corrientes de aire, e incluso órganos auditivos que les permiten percibir sonidos ultrasónicos producidos por depredadores como los murciélagos. Entre todas estas adaptaciones, la visión destaca por su complejidad y versatilidad ver figura 1, convirtiéndose en uno de los sistemas sensoriales más estudiados dentro de la biología y una importante fuente de inspiración para el desarrollo de tecnologías biomiméticas (Land & Nilsson, 2012).

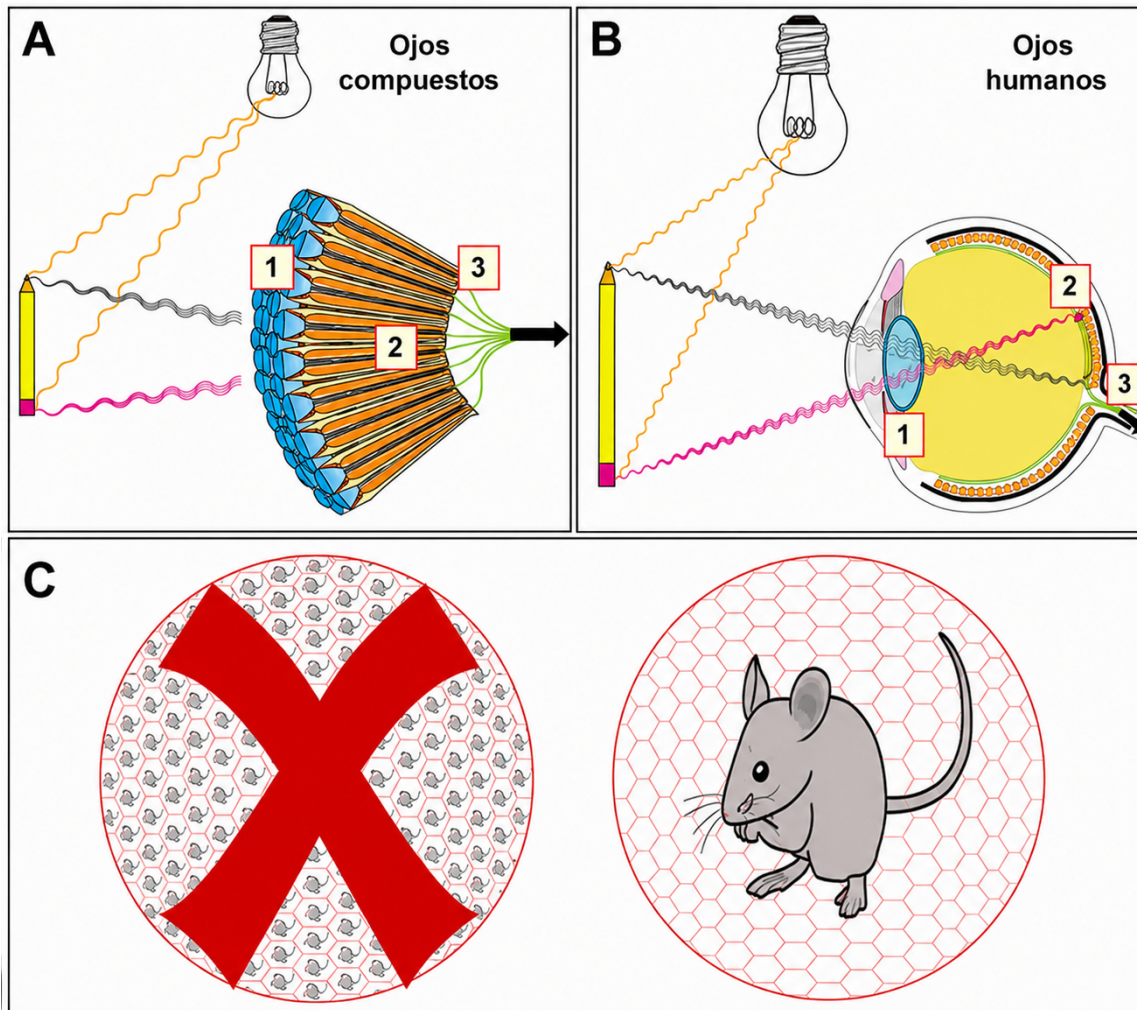
Una de las características más resaltantes de varios grupos de insectos, en especial aquellos que son polinizadores, es su capacidad de detectar la luz ultravioleta. Las abejas, por ejemplo, poseen tres tipos de fotorreceptores sensibles a la longitud de onda ultravioleta, azul y verde, lo que les permite percibir patrones invisibles para los humanos, lo que les permite localizar rápidamente flores y fuentes de alimento como se puede apreciar en la figura 2 (Chittka & Menzel, 1992). Además de percibir ultravioleta, otros insectos pueden detectar la luz polarizada. Este fenómeno ocurre cuando las ondas de luz vibran predominantemente en una dirección en concreto. Por ejemplo, en el cielo la polarización de la luz solar forma patrones que cambian según la posición de la estrella madre con respecto a la Tierra, lo que insectos como las hormigas, libélulas o los escarabajos utilizan para cazar o migrar (Wehner, 2003).

La sofisticación de la visión de los insectos no se limita únicamente a la detección de diferentes longitudes de onda. Muchas especies poseen una velocidad de procesamiento visual notablemente superior a la humana, mientras que una persona percibe una secuencia continua de imágenes a partir de aproximadamente 60 fotogramas por segundo, numerosos insectos pueden distinguir cambios luminosos mucho más rápidos, alcanzando frecuencias de fusión de parpadeo superiores a 200 Hz en algunas especies (Haarlem et al., 2026).

Esta capacidad, comparable e incluso superior a la observada en aves insectívoras especializadas en la caza de presas en vuelo (Boström et al., 2016), les permite reaccionar de forma casi instantánea ante movimientos bruscos, capturar presas en vuelo o escapar de depredadores. Desde una perspectiva ingenieril, estas características representan soluciones biológicas a problemas similares a los que enfrentan los sistemas autónomos de navegación y exploración robótica.

Figura 1.

Diferencia anatómica de forma comparativa entre el ojo compuesto de los insectos y el ojo humano. A. se observa un ojo compuesto, recibe este nombre ya que está formado por la unión de varias subunidades llamadas omatidios, frente al ojo humano en el panel B; en ambos casos las etapas de detección de luz son equivalentes (enfoque, activación de fotorreceptores y transmisión del impulso nervioso), y lo que cambia es la anatomía del ojo y la disposición celular, en los insectos, la conexión nerviosa recibe el nombre de "tallo óptico" en lugar de nervio óptico. El panel C, por su parte, corrige una idea errónea común: no es que cada omatidio perciba una copia idéntica del entorno, sino que cada uno apunta hacia un punto distinto del espacio, y es la integración de toda esa información a nivel del nervio óptico la que genera una imagen compuesta y unificada del entorno (Joshua Heafield et al., 2017).

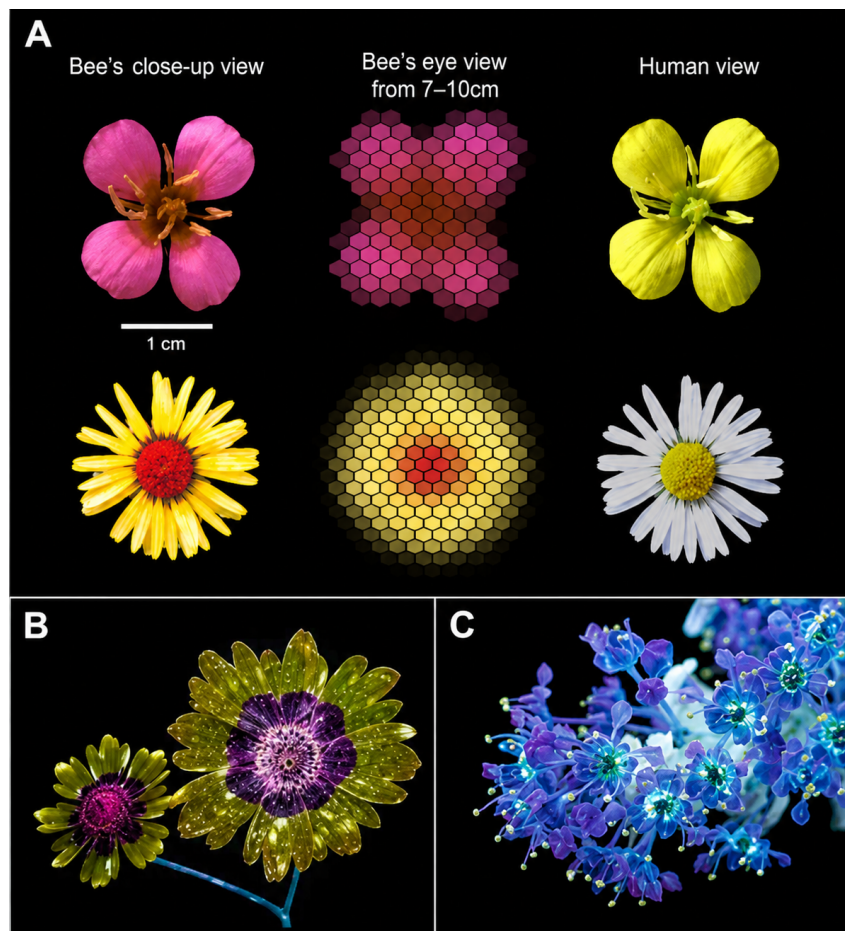


2.3. De la biología a la robótica espacial

La biomímesis es una disciplina de las ciencias e ingeniería que busca solucionar problemas imitando las estructuras, procesos y estrategias de la naturaleza. En este contexto, los sistemas sensoriales de los insectos han servido como modelo para el desarrollo de sensores artificiales y algoritmos de navegación (Webb & Wystrach, 2016). Los ojos compuestos presentan ventajas importantes para sistemas robóticos dedicados a la exploración espacial. Debido a su estructura modular, permitirían construir cámaras con un amplio campo de visión, sensibilidad al movimiento, mientras mantienen un bajo consumo de energía, dado que no siempre se necesitaría estar usando el cien por ciento de las estructuras (Jing et al., 2024). Cabe aclarar que dependiendo de lo que se necesite en el robot, la integración de tecnología que detecte luz polarizada estará más enfocada a la navegación (Li et al., 2023), mientras que la detección de longitudes de onda ultravioleta estará más enfocada en el análisis de muestras (Schwieterman et al., 2018). Independientemente de la función que se le quiera dar, estas características hacen del modelo de ojos compuestos una alternativa atractiva para los vehículos autónomos espaciales que operarían en entornos hostiles.

Figura 2.

Cómo las flores que para el ojo humano presentan colores uniformes pueden mostrar, para una abeja, patrones de contraste muy distintos (A), incluyendo guías de néctar (B) y reflectancias en el espectro ultravioleta (C). Gracias a fotografía especializada que simula la visión del polinizador (Hempel de Ibarra, como se cita en *Ecocolmena*, 2016).



2.3. Campamentos astronómicos y observación del cielo nocturno

La utilización de soluciones inspiradas en organismos vivos no es una idea nueva dentro de la ingeniería aeroespacial. La biomímesis ha contribuido al desarrollo de materiales, estructuras y sistemas robóticos diseñados para operar en ambientes extremos. Por ejemplo, diversos robots exploradores han adoptado principios de locomoción inspirados en insectos para desplazarse sobre terrenos irregulares incluyendo adhesivos inspirados en geos para tareas de servicio orbital y mecanismos de locomoción basados en escarabajos y topos para el desplazamiento sobre regolito granular (Yang et al., 2026), mientras que algunas configuraciones estructurales utilizadas en ingeniería espacial aprovechan geometrías observadas en la naturaleza para maximizar la resistencia mecánica con un peso reducido. Incluso el diseño segmentado del espejo principal del telescopio espacial James Webb emplea una disposición hexagonal que recuerda la eficiencia geométrica de los panales de las abejas, una estructura ampliamente estudiada por su capacidad para optimizar el uso de materiales (McElwain et al., 2023).

En los últimos años, varios grupos de investigación han desarrollado sensores artificiales inspirados en los ojos compuestos que replican la disposición de los omatidios mediante matrices de microlentes (Floreano et al., 2013). Entre ellos destacan los sistemas conocidos como Artificial Compound Eyes (ACE), dispositivos capaces de proporcionar amplios campos de visión utilizando múltiples unidades ópticas distribuidas sobre superficies curvas. Algunos prototipos, como CurvACE, desarrollado por investigadores de la Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL) y del Instituto de Movimiento y Comportamiento de Marsella, lograron integrar cientos de microlentes y fotorreceptores en estructuras ligeras y flexibles capaces de detectar obstáculos y estimar movimientos con gran rapidez (Viollet et al., 2014). Estos sistemas pueden integrarse en rovers o drones, permitiendo mejorar la navegación autónoma en entornos complejos donde los sistemas ópticos convencionales presentan limitaciones (Tyo et al., 2006; Zuger et al., 2010). La figura 3 representa una visión especulativa de hacia dónde podría evolucionar este tipo de tecnología: un módulo sensorial domo, de superficie hexagonal segmentada en cientos de unidades ópticas individuales, integrado a una base con conectores, circuitos y blindaje apto para condiciones extremas. Aunque se trata de una ilustración conceptual y no de un dispositivo real, sintetiza visualmente el principio detrás de sistemas como CurvACE: replicar la arquitectura modular del ojo compuesto en una plataforma robusta, capaz de operar en rovers o drones de exploración planetaria.

Aunque actualmente los exoplanetas solo pueden estudiarse mediante observaciones remotas, tecnologías inspiradas en la visión de los insectos podrían mejorar tanto la caracterización espectral realizada por telescopios espaciales como las futuras plataformas robóticas destinadas a explorar cuerpos del Sistema Solar con potencial astrobiológico. En este contexto, la combinación de sensores multispectrales, polarimetría e inteligencia artificial facilitaría la distinción entre fenómenos físicos como la dispersión de Rayleigh en la atmósfera y señales asociadas a superficies líquidas o biológicamente activas un desafío que requiere observaciones polarimétricas multibanda dado que el brillo polarizado de un océano y el de la dispersión atmosférica pueden solaparse en ciertos ángulos de fase (Schwieterman et al., 2018; Trees & Stam, 2022). Al entrenar modelos de aprendizaje profundo con datos espectrales y polarimétricos, sería posible automatizar la identificación de patrones compatibles con océanos, hielos, minerales específicos o procesos biológicos, optimizando el procesamiento de información y reduciendo la cantidad de datos que deben transmitirse a la Tierra (Schwieterman et al., 2018).

Al entrenar estos modelos con datos multiespectrales o de polarización, es posible automatizar la detección de océanos exoplanetarios y superficies biológicamente activas, optimizando el ancho de banda de las misiones al procesar la información de manera más eficiente (Tyo et al., 2006; Zugger et al., 2010). En este sentido, la combinación de sensores bioinspirados y algoritmos de aprendizaje automático podrían ampliar significativamente las capacidades de exploración de exoplanetas en futuras misiones espaciales.

Figura 3.

Ilustración conceptual de un prototipo modular de sensor tipo "ojo compuesto" para rovers o drones de exploración espacial. Imagen generada con OpenAI



2.4. ¿Cómo vería un extraterrestre su planeta?

Más allá de sus aplicaciones tecnológicas, el estudio de sistemas sensoriales no humanos también tiene implicaciones filosóficas en la astrobiología. La percepción del entorno depende de las adaptaciones evolutivas de cada organismo, en la tierra diferentes especies experimentan el entorno que los rodea de maneras radicalmente distintas. Mientras que los humanos dependen de la visión tricromática en el rango visible del espectro electromagnético, los insectos pueden ver el ultravioleta o luz polarizada.

Si la vida evoluciona en planetas con estrellas como diferentes estrellas madre; con atmósferas de cualquier clase de compuestos; en océanos subterráneos o planetas errantes, es plausible que sistemas sensoriales hayan evolucionado y difieran significativamente con los de la tierra. Por ejemplo, un planeta que orbita una gigante roja, la luz que tendría disponible tendería al infrarrojo. En ese caso los organismos fotosintéticos podrían desarrollar pigmentos que aprovechen esta longitud de onda y por ende los sistemas visuales de organismos que estén relacionados con estos primeros, evolucionarían para poder detectarlos con facilidad.

Desde esta perspectiva, estudiar cómo los organismos ven el mundo, nos recuerda que la forma en la que los humanos percibimos el nuestro planeta, no es universal, sino simplemente una de muchas posibilidades. Para la astrobiología, esta nos propone que para buscar vida fuera de la Tierra, debemos aprender a pensar y ver más allá de nuestras propias limitaciones sensoriales.

3. Conclusiones

La astrobiología enfrenta uno de los desafíos intelectuales más complejos de la ciencia moderna: buscar formas de vida cuya naturaleza podría ser radicalmente distinta a la que conocemos en la Tierra. Durante décadas, gran parte de esta búsqueda ha estado condicionada por marcos conceptuales y tecnológicos derivados de la experiencia humana. Sin embargo, la extraordinaria diversidad biológica de nuestro propio planeta demuestra que no existe una única manera de percibir el entorno. Incluso aquí, organismos que comparten el mismo mundo pueden experimentar realidades sensoriales profundamente diferentes.

Los insectos constituyen un ejemplo particularmente ilustrativo de esta diversidad perceptual. Sus ojos compuestos, su capacidad para detectar luz ultravioleta, interpretar patrones de polarización y procesar información visual con gran rapidez revelan soluciones evolutivas que amplían considerablemente los límites de la percepción humana. Estas adaptaciones no solo han permitido a los insectos convertirse en uno de los grupos animales más exitosos de la historia evolutiva, sino que también representan una valiosa fuente de inspiración para el desarrollo de nuevas tecnologías de observación y exploración.

Desde una perspectiva tecnológica, la biomimesis ofrece la posibilidad de trasladar algunos de estos principios biológicos a sensores artificiales, sistemas de visión por computadora y plataformas robóticas destinadas a operar en ambientes extremos. La combinación de sensores multispectrales, polarimetría e inteligencia artificial podría aumentar nuestra capacidad para detectar señales sutiles asociadas con procesos biológicos, tanto en observaciones astronómicas remotas como en futuras misiones de exploración planetaria. Más importante aún, estos enfoques permitirían explorar regiones del espectro electromagnético que tradicionalmente han recibido menos atención dentro de los programas de búsqueda de vida extraterrestre.

No obstante, la principal contribución de la visión de los insectos a la astrobiología podría no ser tecnológica, sino conceptual. Estudiar cómo otros organismos perciben el mundo nos recuerda que la realidad que experimentamos es solo una entre muchas posibles. Si la evolución produjo en la Tierra sistemas sensoriales tan distintos como los de los insectos, las aves, los peces o los mamíferos, resulta razonable imaginar que la vida en otros mundos podría desarrollar formas de percepción aún más diversas. Bajo esta perspectiva, la búsqueda de vida extraterrestre requiere algo más que telescopios más potentes o algoritmos más sofisticados: exige ampliar nuestra imaginación científica y cuestionar los límites de nuestras propias formas de observar.

Quizás la pregunta fundamental no sea únicamente dónde buscar vida fuera de la Tierra, sino también desde qué perspectiva intentamos reconocerla. En este sentido, los insectos pueden considerarse verdaderos “alienígenas terrestres”: organismos que nos muestran que existen otras maneras de interpretar el entorno y que, precisamente por ello, pueden ayudarnos a imaginar cómo podría percibirse el universo desde otros mundos

Referencias

- Boström, J. E., Dimitrova, M., Canton, C., Håstad, O., Qvarnström, A., & Ödeen, A. (2016). *Ultra-Rapid Vision in Birds*. PLOS ONE, 11(3), e0151099. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0151099>
- Briscoe, A. D., & Chittka, L. (2001). *The evolution of color vision in insects*. Annual Review of Entomology, 46(Volume 46, 2001), 471–510. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV.ENTO.46.1.471/CITE/REFWORKS>
- Catling, D. C., Krissansen-Totton, J., Kiang, N. Y., Crisp, D., Robinson, T. D., Dassarma, S., Rushby, A. J., Del Genio, A., Bains, W., & Domagal-Goldman, S. (2018). *Exoplanet Biosignatures: A Framework for Their Assessment*. Astrobiology, 18(6), 709–738. <https://doi.org/10.1089/AST.2017.1737>
- OpenAI. (2026). *ChatGPT (versión GPT-5.2, con extensión de imágenes ChatGPT Imágenes 2.0) [Modelo de lenguaje de gran escala con generación de imágenes]*. <https://chatgpt.com/>
- Chittka, L., & Menzel, R. (1992). *The evolutionary adaptation of flower colours and the insect pollinators' colour vision*. Journal of Comparative Physiology A, 171(2), 171–181. <https://doi.org/10.1007/BF00188925/METRICS>
- Ecocolmena. (2016). *Cómo ve una abeja Apis mellifera las flores*. <https://www.ecocolmena.org/flores-como-ve-una-abeja-sus-colores-y-formas/>
- Cronin, T. W. ., Johnsen, S., Marshall, N. Justin., & Warrant, E. J. . (2014). *Visual ecology*. Princeton University Press. <https://doi.org/10.23943/princeton/9780691151847.001.0001>
- Cronin, T. W., & Bok, M. J. (2016). *Photoreception and vision in the ultraviolet*. Journal of Experimental Biology, 219(18), 2790–2801. <https://doi.org/10.1242/JEB.128769>
- Floreano, D., Pericet-Camara, R., Viollet, S., Ruffier, F., Brückner, A., Leitel, R., Buss, W., Menouni, M., Expert, F., Juston, R., Dobrzynski, M. K., L'Eplattenier, G., Recktenwald, F., Mallot, H. A., & Franceschini, N. (2013). *Miniature curved artificial compound eyes*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 110(23), 9267–9272. <https://doi.org/10.1073/PNAS.1219068110>
- Grimaldi, D. A., & Engel, M. S. (2005). *Evolution of the insects*. Cambridge University Press. <https://www.cambridge.org/pe/universitypress/subjects/life-sciences/entomology/evolution-insects?format=HB&isbn=9780521821490>
- Haarlem, C. S., Hynes, C., Jackson, A. L., Mitchell, K. J., O'Connell, R. G., & Healy, K. (2026). *Pace of ecology drives the tempo of visual perception across the animal kingdom*. Nature Ecology & Evolution 2026 10:4, 10(4), 712–720. <https://doi.org/10.1038/s41559-026-02994-7>
- Jing, X., Li, S., Zhu, R., Ning, X., & Lin, J. (2024). *Miniature bioinspired artificial compound eyes: microfabrication technologies, photodetection and applications*. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 12, 1342120. <https://doi.org/10.3389/FBIOE.2024.1342120/FULL>
- Joshua Heafield, Charlotte Blackburn, Sanjai Patel, & Andreas Prokop. (2017). *LESSON 5 – Vision: Understanding light perception*. <https://drosoph4schools.wordpress.com/15-vision/>
- Kiang, N. Y., Siefert, J., Govindjee, & Blankenship, R. E. (2007). *Spectral signatures of photosynthesis. I. Review of Earth organisms*. Astrobiology, 7(1), 222–251. <https://doi.org/10.1089/AST.2006.0105>

- Krissansen-Totton, J., Bergsman, D. S., & Catling, D. C. (2016). *On Detecting Biospheres from Chemical Thermodynamic Disequilibrium in Planetary Atmospheres*. *Astrobiology*, 16(1), 39–67. <https://doi.org/10.1089/AST.2015.1327>
- Land, M. F., & Nilsson, D.-E. (2012). *Animal Eyes*. <https://doi.org/10.1093/ACPROF:OS0/9780199581139.001.0001>
- Li, S., Kong, F., Xu, H., Guo, X., Li, H., Ruan, Y., Cao, S., & Guo, Y. (2023). *Biomimetic Polarized Light Navigation Sensor: A Review*. *Sensors* 2023, Vol. 23, Page 5848, 23(13), 5848. <https://doi.org/10.3390/S23135848>
- Lovelock, J. E. (1965). *A Physical Basis for Life Detection Experiments*. *Nature* 1965 207:4997, 207(4997), 568–570. <https://doi.org/10.1038/207568a0>
- 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., Aiello, K., Atkinson, C., Barinek, B., Barto, A., Basinger, S., Beck, T., Bergkoetter, M. D., Bluth, M., . . . 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), 2023. <https://doi.org/10.1088/1538-3873/acada0>
- Schwieterman, E. W., Kiang, N. Y., Parenteau, M. N., Harman, C. E., Dassarma, S., Fisher, T. M., Arney, G. N., Hartnett, H. E., Reinhard, C. T., Olson, S. L., Meadows, V. S., Cockell, C. S., Walker, S. I., Grenfell, J. L., Hegde, S., Rugheimer, S., Hu, R., & Lyons, T. W. (2018). *Exoplanet Biosignatures: A Review of Remotely Detectable Signs of Life*. *Astrobiology*, 18(6), 663–708. <https://doi.org/10.1089/AST.2017.1729>
- Seager, S. (2014). *The future of spectroscopic life detection on exoplanets*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(35), 12634–12640. <https://doi.org/10.1073/PNAS.1304213111>
- Seager, S., Turner, E. L., Schafer, J., & Ford, E. B. (2005). *Vegetation's red edge: A possible spectroscopic biosignature of extraterrestrial plants*. *Astrobiology*, 5(3), 372–390. <https://doi.org/10.1089/AST.2005.5.372>
- Trees, V. J. H., & Stam, D. M. (2022). *Ocean signatures in the total flux and polarization spectra of Earth-like exoplanets*. *Astronomy & Astrophysics*, 664, A172. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243591>
- Tyo, J. S., Goldstein, D. L., Chenault, D. B., & Shaw, J. A. (2006). *Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications*. *Applied Optics*, Vol. 45, Issue 22, Pp. 5453-5469, 45(22), 5453–5469. <https://doi.org/10.1364/AO.45.005453>
- Viollet, S., Godiot, S., Leitel, R., Buss, W., Breugnon, P., Menouni, M., Juston, R., Expert, F., Colonnier, F., L'Eplattenier, G., Brückner, A., Kraz, F., Mallot, H., Franceschini, N., Pericet-Camara, R., Ruffier, F., & Floreano, D. (2014). *Hardware Architecture and Cutting-Edge Assembly Process of a Tiny Curved Compound Eye*. *Sensors* 2014, Vol. 14, Pages 21702-21721, 14(11), 21702–21721. <https://doi.org/10.3390/S141121702>
- Webb, B., & Wystrach, A. (2016). *Neural mechanisms of insect navigation*. *Current Opinion in Insect Science*, 15, 27–39. <https://doi.org/10.1016/J.COIS.2016.02.011>
- Wehner, R. (2003). *Desert ant navigation: how miniature brains solve complex tasks*. *Journal of Comparative Physiology A* 2003 189:8, 189(8), 579–588. <https://doi.org/10.1007/S00359-003-0431-1>



- Yang, S. X., Li, J., Chen, G., Lei, X., Li, S., Lodewijks, G., Zhang, R., & Zou, M. (2026). *Bioinspired Design for Space Robots: Enhancing Exploration Capability and Intelligence*. *Biomimetics* 2026, Vol. 11, Page 30, 11(1), 30. <https://doi.org/10.3390/BIOMIMETICS11010030>
- Zugger, M. E., Kasting, J. F., Williams, D. M., Kane, T. J., & Philbrick, C. R. (2010). *LIGHT SCATTERING FROM EXOPLANET OCEANS AND ATMOSPHERES*. *The Astrophysical Journal*, 723(2), 1168. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/723/2/1168>