

Lilia Montoya y Elva Escobar-Briones

Los océanos del sistema solar

El punto azul pálido que presenta la Tierra a la distancia resulta del hecho de que está cubierta por agua en casi un 71% de su superficie. Si bien inmenso, este océano es menor si se lo compara con los de Encélado (satélite de Saturno) y Europa (satélite de Júpiter). Estos océanos han sido evidenciados, por ejemplo, gracias a la misión espacial Cassini que, al sobrevolar a Encélado, encontró chorros de agua que emanan de su hemisferio sur. Por tanto, la oceanografía ya no se restringe a la Tierra porque existen exo-océanos y éstos podrían ocurrir también en otros cuerpos del sistema solar exterior.

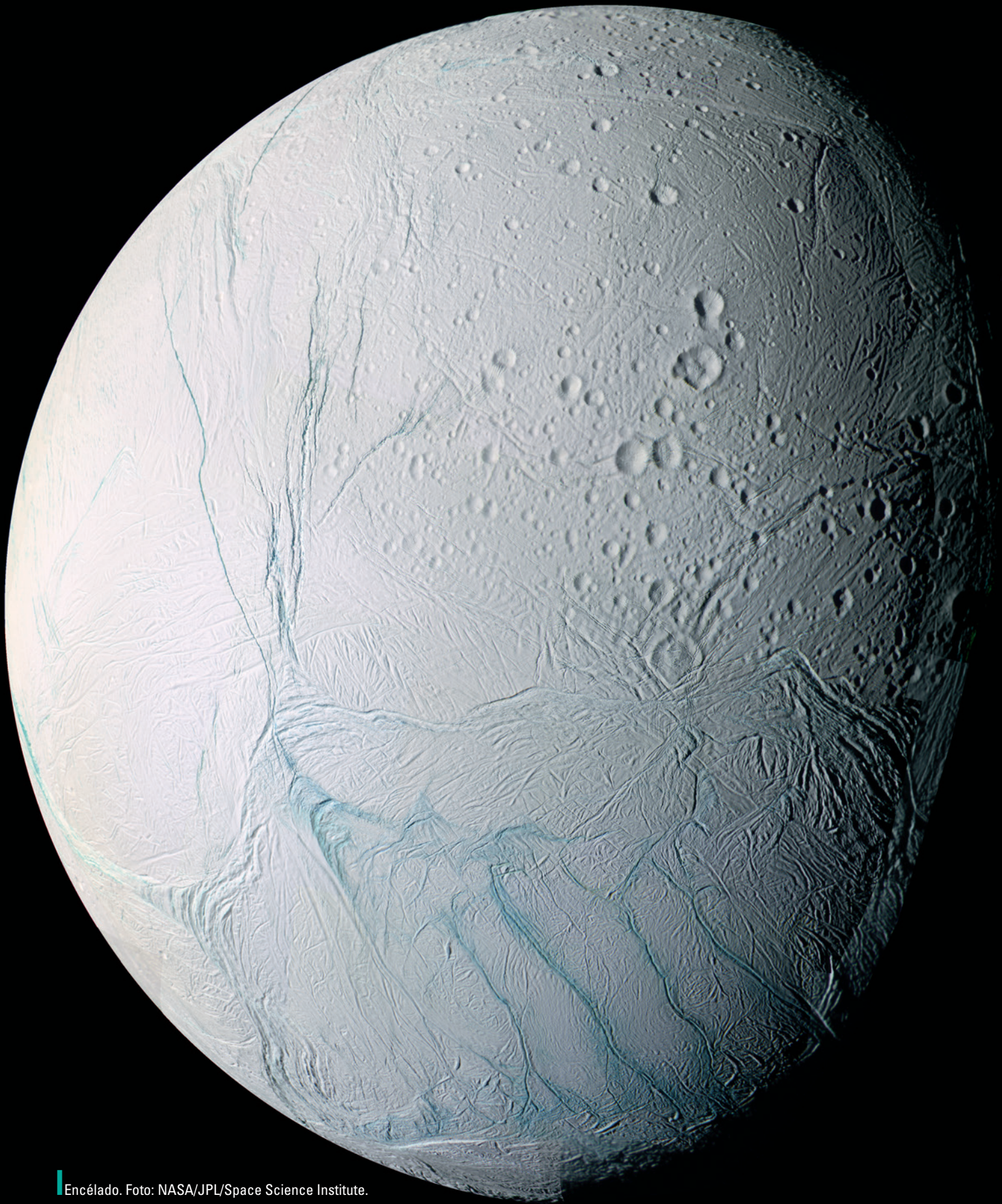
Introducción

El debate acerca de la vida en el sistema solar inició en Marte, un planeta terrestre cuyas estructuras fueron interpretadas como canales por Giovanni Schiaparelli en 1877. Seguidamente, en el imaginario científico y literario estaba implícita la imagen de “la vida extraterrestre” al pensar en Marte. Transcurrieron aproximadamente cien años para que los satélites de hielo del sistema solar exterior irrumpieran en el debate.

Marte y la Tierra, al igual que Venus y Mercurio, se agrupan como planetas terrestres por guardar similitudes en cuanto a tamaño, geología y composición química. Las similitudes han explicado y justificado que desde un inicio se haya supuesto y buscado vida en Marte. Irónicamente, es más allá de Marte, en algunos satélites de hielo de Júpiter, Saturno y probablemente Urano, en donde se ha encontrado la triada de la vida para la astrobiología: moléculas orgánicas, agua líquida y fuente de energía.

Coincidencia afortunada

Durante la década de los 70 se produjeron avances científicos en áreas tan distantes que sólo la ciencia ficción encabezaría la inusual combinación de lo que a la



Encélado. Foto: NASA/JPL/Space Science Institute.

Cuadro 1. Antecedentes históricos o de trasfondo que forjaron la idea de la astrobiología de los exo-océanos

1979	John B. Corliss y cols. confirman la circulación convectiva de agua marina en las crestas oceánicas: las ventilas hidrotermales, un ecosistema reconocido por geofísicos marinos del Instituto Scripps de Oceanografía de California, en 1973.
1979	Imágenes obtenidas durante los sobrevuelos de las naves espaciales Voyager 1 y 2 sobre el sistema joviano descubren que la superficie helada de Europa está accidentada, lo que sugiere que el interior podría estar térmicamente activo.
1977	Carl Woese reestructura la clasificación de los seres vivos en tres dominios, estableciendo el uso del gen ribosomal 16S rRNA como fuente informativa para comparar a todos los seres vivos.
1975	El físico planetario Guy J. Consolmagno publica una tesis enfocada en la energía térmica de los satélites de hielo que propone un océano en estado líquido al interior de Europa.
1974-1975	Gordon de Quetteville Robin y cols. reconocen por ecosondeo lagos subglaciales en la Antártida, sugeridos desde 1968, entre los que destaca el Lago Vostok como el mayor y más profundo de todos.
1974	Robert D. MacElroy propone el término extremófilo, que significa “amantes de lo extremo,” y utiliza como organismos de referencia a los termófilos y halófilos, los cuales crecen preferentemente en condiciones de temperatura y salinidad altas.


postre se convertiría en la astrobiología del sistema solar exterior. En el cuadro 1 se presenta un recuento de los hitos más importantes que incentivaron la astrobiología de los satélites de hielo.

Sin duda, la ciencia se sirve de la imaginación y viceversa. Un claro ejemplo de esto es Europa, uno de los satélites de Júpiter. En 1980 el autor Richard G. Hoagland publica una nota titulada “The Europa enigma” y propone que podría haber vida en un océano con ambientes hidrotermales de dicho satélite. Hoagland llamó la atención hacia Europa de Arthur C. Clark, quien situaría ahí sucesos significativos de su novela 2010: *El año que hicimos contacto*. Sin embargo, abrirse a la creatividad tiene límites y un costo, como resulta evidente en los escritos de Hoagland, autor prolífico para lectores ávidos de teorías, que la comunidad científica califica como pseudociencia.

Una propuesta con sustento cuantitativo sobre la habitabilidad de Europa fue la de Reynolds y cols., publicada en 1983. En ésta encontramos la primera formulación de lo que actualmente se conoce en astrobiología como “Follow the water” (“seguir el agua”), la cual propone como directriz que el hallazgo de agua líquida en un objeto celeste es un primer filtro para que un sitio sea considerado habitable. Este artículo significó también que en la astrobiología, otrora exobiología, se contaba con conceptos, métodos y tecnologías suficientes para resolver hipótesis más lejanas, incluyendo el uso de uno de los términos más comunes de la jerga astrobiológica:

habitabilidad. Cabe mencionar que los autores dan crédito a Hoagland en sus referencias, además de a Arthur C. Clark.

 **Los exo-océanos**

 ¿Cómo permanece líquida el agua para formar océanos? El calor que funde el hielo proviene de un proceso conocido como mareas gravitacionales. Algunos de los satélites del sistema solar exterior retuvieron agua desde su agregación original y ésta permanecería en estado sólido de no ser por las deformaciones periódicas causadas por la atracción hacia su planeta. Las mareas provocan una fricción del material interior que se disipa en forma de calor y puede incluso fundir el hielo. Y no sólo los gigantes gaseosos exteriores contribuyen al calentamiento por mareas, algunos satélites cercanos son masivos también (por ejemplo, Titán y Ganímedes), de manera que, aunque el campo gravitacional podría estabilizarse adquiriendo una órbita circular (es decir, con una excentricidad de cero) y disminuir el efecto de marea, la atracción gravitacional ejercida por otros satélites determina órbitas excéntricas o elípticas. En satélites como Europa en el sistema joviano, o Encélado, una luna de Saturno, el efecto del campo gravitacional ejercido por los satélites masivos determina que ocurra entre ellos resonancia orbital, es decir, sus periodos de traslación guardan una proporción geométrica o en armónicos; por ejemplo, los satélites

mayores de Júpiter: Ío, Europa, Ganímedes, conocidos como galileanos por su descubridor, Galileo, quien también reportó que presentan una resonancia entre sí de 4:2:1 (Figura 1).

De esta manera, las misiones espaciales enfocadas al sistema solar exterior contenían instrumentos para ayudar a discernir la existencia de agua líquida en los satélites mayores; por ejemplo, los satélites galileanos en Júpiter, Titán o Encélado en Saturno y Tritón en Urano. Podría decirse que, en cuanto a las ciencias oceánicas del sistema solar exterior, dos misiones tributaron lo que para la Tierra constituyeron hace 150 años las campañas oceanográficas Challenger (1872-1876). Nos referimos a la misión Galileo (1995-2003) de la NASA y la Cassini-Huygens (2004-2017) de la NASA y la Agencia Espacial Europea (ESA) (Figura 2).

Galileo fue la primera misión que partía al sistema solar con la suposición de la existencia de océanos, de manera que buscó explorar a los satélites galileanos con muy diferentes instrumentos. Al parecer la prueba más concluyente de la presencia de un océano en Europa es su campo magnético. La explicación de este campo se reduciría a que existan sales disueltas en el agua. El agua salada es un material conductor inducido por Júpiter.

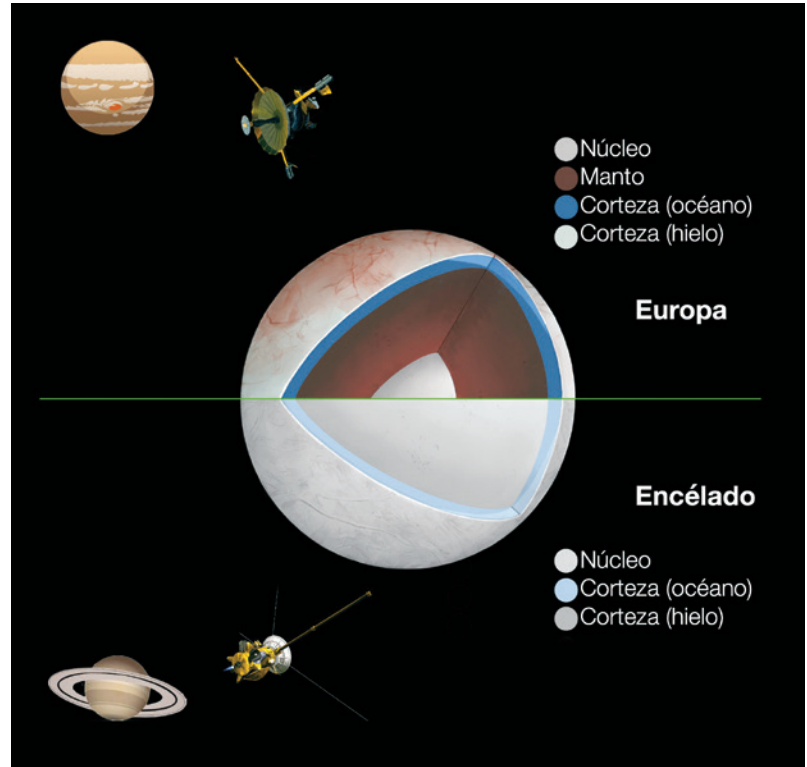


Figura 1. Estructura interna de Europa (panel superior) y Encélado (panel inferior), con las misiones espaciales que más han aportado a su entendimiento: Galileo y Cassini. Imagen: Lilia Montoya y Citlame F. Franco Rodríguez.

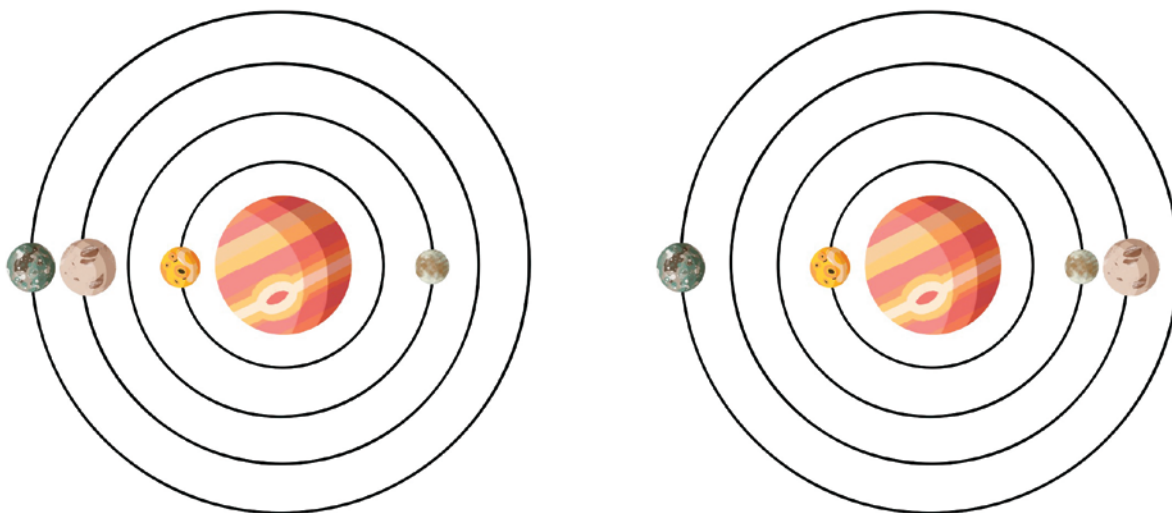


Figura 2. Sistema joviano con los satélites mayores. Del interior al exterior: Júpiter, Ío, Europa, Ganímedes, Calisto. Cada vez que Ganímedes hace una órbita alrededor de Júpiter, Europa e Ío hacen dos y cuatro, respectivamente. Esta “resonancia” se produce en la proporción 1:2:4. Europa es atraída por campos gravitacionales cambiantes, por ejemplo, el campo acumulado de Júpiter y los otros tres satélites galileanos (panel de la izquierda); otro escenario es una distorsión gravitacional por ambos flancos (panel de la derecha). Imagen: Lilia Montoya y Citlame F. Franco Rodríguez.

Una aportación más de la misión Galileo fue el discernir la composición química del océano; es decir, además de agua, ¿cuáles sales podríamos encontrar? Esta información es de suma importancia para la habitabilidad, pues se sabe que los seres vivos toleran condiciones físicas y fisicoquímicas definidas. De manera que en estos océanos no necesariamente encontraremos cloruro de sodio como ocurre en nuestro planeta.

La misión Cassini-Huygens, con sólo sobrevolar Encélado, nos ofreció una vista lo suficientemente motivadora para desear volver con una instrumentación más sofisticada. Durante su primera visita a Encélado se apreciaron chorros de agua que emanaban del polo sur –antes mencionados–. Además, la instrumentación de Cassini indicó la presencia de metano y partículas nanométricas de sílice. El conjunto de estos hallazgos sustenta la hipótesis de que este satélite de Saturno contiene un océano y actividad hidrotermal en su interior.

 **Ambientes análogos en México a los de los exo-océanos**

La Tierra es la referencia de un mundo oceánico. Éste ha sido el océano mejor estudiado en el sistema solar y valida la definición de la Hoja de Ruta para Mundos Oceánicos del grupo de evaluación de Planetas Exteriores de la NASA que describe un “mundo oceánico” un cuerpo que cuenta actualmente con un océano en estado líquido. Algunos de estos cuerpos perdieron o siguen perdiendo el agua. Otro término que refiere a algunos de estos cuerpos es “lunas de hielo”. Una fuente de energía es un requerimiento fundamental para mantener líquido el océano, especialmente a gran distancia del Sol; con ello, se proporcionan condiciones para la evolución y desarrollo de vida. Dicha fuente de energía puede ser externa (la presencia de un satélite o planeta con energía gravitacional y mareomotriz) e interna (geológica y geoquímica).

En la búsqueda de vida en mundos oceánicos contemporáneos y con océanos pasados en el sistema solar, existen diversos criterios. Debido a que la exploración espacial aún no ha confirmado la pre-

sencia de exo-océanos, uno de los criterios es reconocer análogos o ejemplos equiparables en los cuerpos de agua de la Tierra que podrían ejemplificar a los exo-océanos en el sistema solar. Los análogos son ambientalmente extremos para la vida actual, no así para la vida pasada. La diversidad geológica y ambiental en el océano actual y en cuerpos de agua en el planeta Tierra se ejemplifican vastamente conforme se lleva a cabo la exploración. A continuación, se citan algunos sistemas análogos de valor y utilidad para el estudio de los exo-océanos:

1. Las salmueras ricas en cloruro de magnesio ($MgCl_2$), de interés en futuras misiones por su capacidad de preservar biomarcadores genéticos.
2. El mar profundo con y sin actividad hidrotermal, bajo hielo, de fondos con arcillas, elevada concentración de materia orgánica y con condiciones hipóxicas y anóxicas.
3. Lagos submarinos de salmuera, infiltraciones de metano y volcanes de asfalto.

La comunidad científica nacional e internacional ha estudiado en México sitios con condiciones equiparables y criterios que caracterizarían a los exo-océanos:

1. Cuerpos de agua epicontinentales:
 - pozas caracterizadas por sulfato de calcio o yeso en Cuatro Ciénegas, Coahuila;
 - lagos ricos en salmueras de $MgCl_2$ en Rincón de Parangueo, Guanajuato, y Hundido, Coahuila;
 - cenotes profundos en el Sistema Zacatón, Tamaulipas;
 - lagos formados durante la explosión de volcanes denominados como “maar”; un ejemplo es el lago Alchichica, en Puebla, característicamente salino, alcalino sódico, con hipoxia y anoxia temporal y con concentraciones importantes de magnesio;
 - lago con sulfato de sodio (tequesquite), carbonato de calcio y cloruro de sodio en Texcoco, Estado de México;
 - lagos con elevada radiación uv en el Nevado de Toluca, Estado de México;

- aguas con ácido sulfúrico (H₂S) en el lago Chichonal, Chiapas, y la Cueva Villa Luz, Tabasco;
 - cuerpos de agua costeros hipersalinos, ricos en MgCl₂, en Guerrero Negro, Baja California; y laguna Mar Muerto, Oaxaca.
2. Ventiladas hidrotermales o sistemas de convección de agua con elevada temperatura y compuestos minerales en algunas localidades del fondo marino. En México se han descrito en el Golfo de California; y en el Pacífico Oriental Tropical:
 - ventilas en aguas poco profundas o someras de Punta Banda y Bahía Concepción, Baja California; y en Punta Mita, Nayarit, con elevadas concentraciones de dióxido de carbono (CO₂), nitrógeno (N₂), metano (CH₄) y ácido sulfúrico (H₂S);
 - ventilas profundas de las cuencas Alfonso, Pescadero, Guaymas, 21° N en la Dorsal del Pacífico Oriental y el Archipiélago Revillagigedo.
 3. Infiltraciones de metano y chapopoterías profundas:
 - infiltraciones del Margen de Sonora, Golfo de California;
 - diapiros o domos de sal que ascienden a través de fracturas en el fondo marino y chapopoterías en el talud continental o zona batial de la Sonda de Campeche.
 4. Sedimento y agua profundos, así como zona hadal (zona más profunda del océano, a más de 6 500 metros):
 - zona de oxígeno mínimo del Pacífico Oriental Tropical;
 - Trinchera Mesoamericana.

La exploración espacial

La exploración de los exo-océanos está garantizada para una o dos décadas más con las misiones JUICE (del inglés JUPITER ICy moons Explorer) –desarrollada por la Agencia Espacial Europea y que fue lanzada en abril del 2023– y Europa Clipper y Hera, de la NASA, proyectada para lanzarse en octubre 2024, misiones que han coincidido con la Década de los Océanos (2021-2030) para el Desarrollo Sostenible, declarada por la ONU. Esta exploración necesitará



referentes experimentales y ambientales, como es el caso de nuevas formas de identificar planetas habitables y planetas potencialmente habitados, comparando la cantidad de dióxido de carbono en sus atmósferas, pues los valores bajos sugieren que hubo agua líquida que se disolvió o fue secuestrada en el océano, en el sedimento o en la biomasa.

Lilia Montoya

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.
lilia.montoya@ciencias.unam.mx

Elva Escobar Briones

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.
escobri@cmarl.unam.mx

Lecturas recomendadas

- German, C. R. *et al.* (2021), “Ocean system science to inform the exploration of ocean worlds”, *Oceanography*, 35(1):16-22.
- Hendrix, A. R. *et al.* (2019), “The NASA Roadmap to Ocean Worlds”, *Astrobiology*, 19(1):1-27.
- Howell, S. M., W. C. Stone y K. Craft (2020), “Ocean worlds exploration and the search for life”. Disponible en: <doi.org/10.48550/arXiv.2006.15803>.
- Joseph, A. (2023), *Water Worlds in the Solar System*, Países Bajos, Elsevier.
- Martin, A. y A. McMinn (2018), “Sea ice, extremophiles and life on extra-terrestrial ocean worlds”, *International Journal of Astrobiology*, 17(1):1-16.
- Montoya, L., G. Cordero y S. Ramírez (2022), *Astrobiología: una visión transdisciplinaria de la vida en el universo*, México, FCE/UNAM/ICN.