

Vehículos submarinos autónomos para un océano Ártico cambiante

El Ártico es el más cambiante de los océanos. Las anomalías y perturbaciones climáticas son más notorias en esta zona que en otras latitudes. El uso de vehículos submarinos autónomos permite registrar los cambios físicos y biogeoquímicos en esta región polar, realizar el monitoreo de la fauna y del tráfico marino en sus aguas e, inclusive, redefinir las fronteras marítimas de los países árticos.

■ El océano Ártico, escenario del cambio climático

■ Ubicado en la región polar del hemisferio norte, el océano Ártico ocupa un área cercana a los 14 millones de kilómetros cuadrados y es el más pequeño de los océanos (véase la Figura 1). Este gran cuerpo de agua dentro del Círculo Polar Ártico está rodeado por los territorios de Canadá, Groenlandia, Islandia, Noruega, Rusia y Estados Unidos de América. Se comunica con el océano Atlántico Norte mediante el mar de Barents y el estrecho de Fram; toca también el Pacífico a través del estrecho de Bering.

El Ártico es un océano estratificado: formado por varias capas de agua con diferentes características de densidad y temperatura, como un pastel mil hojas. Durante gran parte del año lo recubre una capa de hielo marino (llamada banquisa) que alcanza su máximo de cobertura en el invierno y el mínimo al final del periodo estival. Este océano alberga a cerca de 400 especies animales, incluidos grandes mamíferos marinos, como osos polares, focas, morsas, narvales y otros cetáceos. No obstante, por sus características, es un ecosistema frágil y su estabilidad depende de pequeños organismos fotosintéticos, como las microalgas, cuya producción primaria depende del acceso a la luz solar. Durante el invierno, la noche polar puede durar 24 horas; en los veranos, el día polar y el sol de medianoche se extienden por un periodo similar.

El océano Ártico es también el hogar de 40 grupos étnicos, cuya sustentabilidad está estrechamente ligada al mar, tanto en verano como en invierno. Además esta región es el escenario principal del cambio climático en el norte del planeta, donde los efectos son más notorios, rápidos e intensos que en latitudes menores.



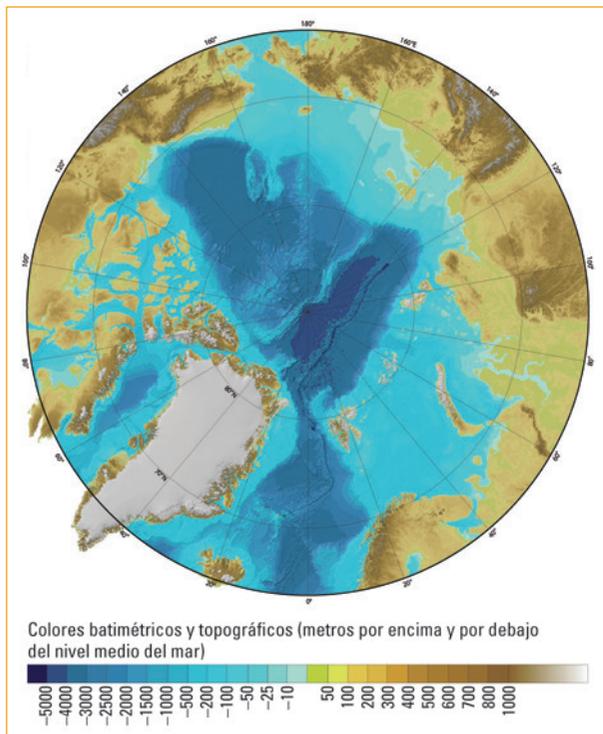


Figura 1. Mapa batimétrico y topográfico del océano Ártico. Los colores están asociados a una determinada profundidad (azules) o elevación (marrón), indicada en metros. Fuente: The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0, *Geophysical Research Letters*.

Un fenómeno evidente es la pérdida acelerada de la banquisa durante el verano; se estima que la cobertura de hielo decrece 13.1% cada década (NSIDC, 2020). Este evento da lugar a un efecto denominado Pan-Ártico, que modifica tanto la temperatura del agua y las condiciones de luz como las relaciones dentro de la cadena trófica (conocida como cadena alimenticia).

La comunidad científica concuerda en que los siguientes cambios sistémicos pueden esperarse: pérdida de la banquisa en el periodo estival, cambios en la circulación oceánica, acidificación del agua, disminución o derretimiento de los glaciares de Groenlandia y deshielo del permafrost (capa de suelo permanentemente congelado) en territorios insulares y continentales. Entre los cambios biológicos, se pueden esperar perturbaciones en la cadena trófica, desplazamiento o disminución de la flora y fauna locales, así como su remplazo por otras especies meridionales. Además, el océano Ártico también experimentará cambios sociales, económicos y de seguridad, como el desplazamiento de la cultura Inuit

(habitantes originarios) y el incremento en la densidad demográfica. También sufrirá por el aumento del tráfico marítimo y la apertura de nuevas rutas de navegación, dado el creciente interés en la explotación mineral y de hidrocarburos, y posiblemente por la redefinición de las fronteras actuales, ya que hay países al exterior del Círculo Polar Ártico que también han puesto atención en la región. Un caso especial es el de China, que ve a este océano como una zona de valor en su ambiciosa iniciativa de desarrollo de infraestructura global y cooperación internacional llamada la Franja y la Ruta (Belt and Road).

■ Los vehículos autónomos submarinos

■ Durante la última década, la robótica marina se ha posicionado como una tecnología madura para el estudio y la caracterización de los océanos, de manera específica, mediante el uso de vehículos autónomos submarinos (véase el Recuadro 1). Hay diferentes tipos de robots para cubrir las necesidades de cada investigación, con características, capacidades y consumos energéticos diferentes.

Los flotadores son robots que derivan con las corrientes marinas, ya que no tienen capacidad de dirección. Mediante un circuito hidráulico, controlan su flotabilidad y pueden situarse en profundidades precisas de la columna de agua; de esta manera, se comportan como lo haría un globo aerostático en el aire. Por lo general, durante su ciclo de navegación, descienden hasta una profundidad de 2 000 metros y ascienden a la superficie haciendo el muestreo de las variables científicas. Durante el ciclo de muestreo, diversos sensores recolectan datos físicos y biogeoquímicos, como la salinidad, temperatura, clorofila, materia orgánica disuelta, oxígeno disuelto, niveles de luz solar (radiancia), nitratos, retrodispersión de la luz y el pH. Estos robots pueden flotar y derivar durante años recolectando y transmitiendo datos de interés, puesto que su consumo de energía es muy bajo.

Los planeadores submarinos son robots que se deslizan en las corrientes marinas y sí tienen capacidad de dirección. Un circuito hidráulico les permite controlar su flotabilidad y, por medio de dos alerones, consiguen desplazarse horizontalmente siguiendo

Recuadro 1. Robótica marina

Los vehículos autónomos submarinos son robots utilizados para aumentar o disminuir la escala espacio-temporal de los sondeos científicos. Éstos se desplazan por cuenta propia atravesando los océanos, o bien son comandados desde una embarcación o desde una base terrestre, y son capaces de cubrir un volumen oceánico considerable. Esta tecnología complementa el esfuerzo hecho a bordo de los buques oceanográficos de investigación científica para

potencializar el monitoreo global de los mares. Su uso requiere menos recursos que un buque oceanográfico y los datos obtenidos son igualmente valiosos, más numerosos y menos costosos. Hay tres tipos principales de vehículos autónomos submarinos utilizados en las regiones polares: los flotadores, los planeadores submarinos y los vehículos autónomos autopropulsados (véase la Figura 2).

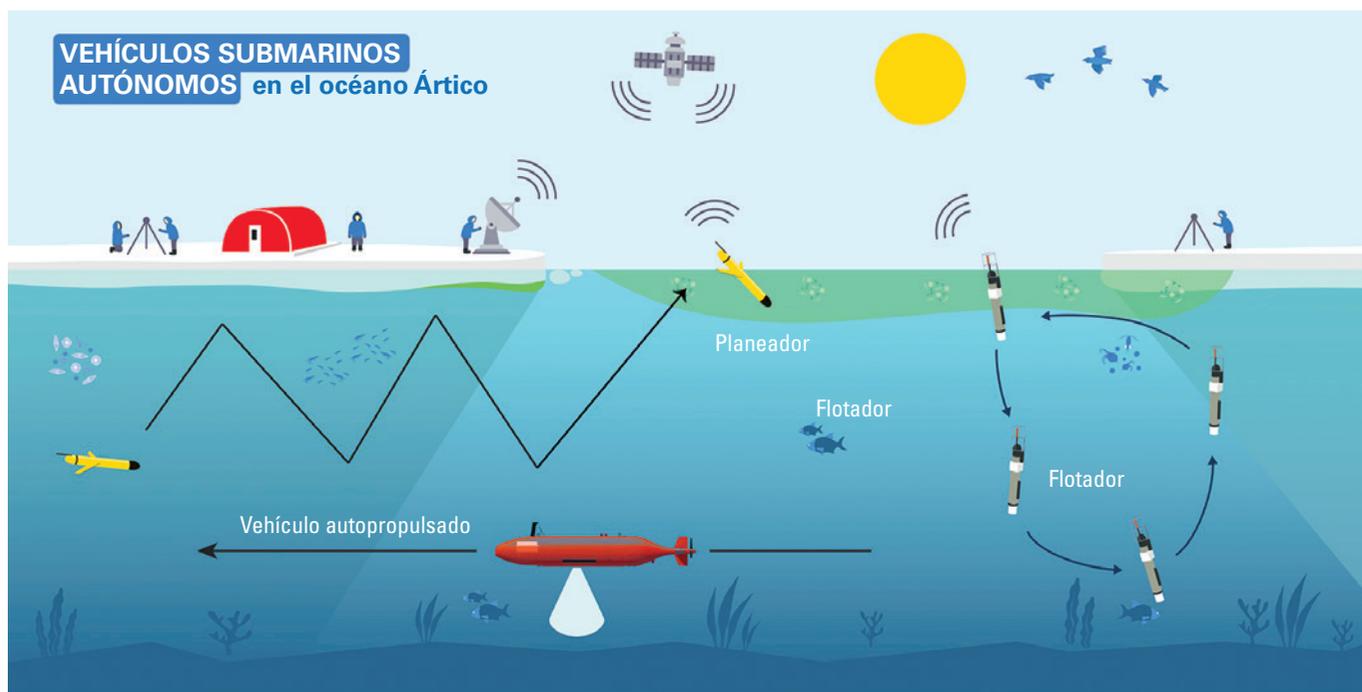


Figura 2. Vehículos submarinos autónomos en el océano Ártico. Los flotadores derivan con las corrientes mientras ascienden y descienden a través de la columna de agua. Los planeadores marinos se deslizan en las corrientes siguiendo un patrón de dientes de sierra. Los vehículos submarinos autopropulsados se desplazan ayudados por una hélice. Fuente: Laboratorio Takuvik/Julie Sansoulet.

un patrón de dientes de sierra. Planean bajo el agua como lo haría un avión planeador en el aire y son vehículos versátiles con un bajo o medio consumo de energía, por lo que llevan a cabo misiones extensas en tiempo y espacio. Un planeador es capaz de recorrer cientos y hasta miles de kilómetros durante semanas o meses mientras va realizando el muestreo de datos de interés. Los planeadores marinos están equipados con sensores físicos y biogeoquímicos; además, pueden contar también con sistemas acústicos pasivos, para analizar el ambiente sonoro bajo el agua.

Se han desarrollado también vehículos autopropulsados que se trasladan a través de las corrientes ayudados por una hélice. Este tipo de vehículos tienen flotabilidad neutra y pueden desplazarse a una profundidad constante manteniendo una velocidad de hasta 4 nudos (un nudo equivale a 1.852 km/h). Comparados con los vehículos descritos anteriormente, su consumo de energía es alto; sin embargo, su maniobrabilidad es mayor y se desplazan como lo haría un avión de hélice en el aire. Con ellos, se pueden planear misiones precisas y rápidas, con una duración

de horas o días, extendidas por decenas o cientos de kilómetros. Debido a la potencia elevada de sus baterías, son capaces de integrar sistemas acústicos activos, como ecosondas, sonares de barrido lateral y sensores de subsuelo. Con estos sistemas a bordo del vehículo, es posible cartografiar el fondo marino.

■ **Adaptarse a un océano como ningún otro**

■ Los vehículos submarinos autónomos en el océano Ártico se enfrentan a desafíos mayores que en los océanos de otras latitudes. En primer lugar, la temperatura del agua desciende hasta $-1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$; bajo estas condiciones, numerosos sensores comerciales presentan problemas en ambientes tan fríos. En segundo lugar, las operaciones de lanzamiento y recuperación son más costosas que en latitudes menores. No obstante, el mayor peligro para estos robots marinos es el hielo de mar (véase el Recuadro 2).

La técnica más simple que puede utilizar un vehículo submarino autónomo para percibir la presencia o ausencia de hielo en la superficie consiste en medir

la temperatura del agua mientras asciende (Le Traon y cols., 2020). Sin embargo, esta solución tiene como desventaja su carácter local. El umbral varía según la zona, lo que significa un problema de movilidad que, a su vez, puede resolverse con técnicas de aprendizaje automático.

El diseño de sensores para la detección de hielo es otra alternativa que ha tenido buenos resultados. Los sistemas optoelectrónicos activos aprovechan las características físico-ópticas del hielo marino, como su capacidad de despolarizar la luz (Lagunas y cols., 2018). Mediante el uso de un haz de luz coherente (láser), un sensor de este tipo puede evaluar la presencia o ausencia de banquisa en la superficie y al mismo tiempo es capaz de hacer mediciones de su grosor.

También se utilizan sistemas acústicos activos para la navegación de estos vehículos bajo el hielo. Los altímetros revertidos, técnica en la cual el transductor apunta hacia la superficie, son otra alternativa. Aunque estos sensores permiten un rango de medición mucho mayor que los sistemas ópticos, su resolución es inferior y no son recomendables en la presencia de capas finas de hielo.

Hay sistemas más avanzados y complejos que también se utilizan a bordo de los vehículos que cumplen con los requerimientos de energía y capacidad volumétrica para portarlos. Estos sistemas no son solamente útiles para la detección del hielo, sino también para la navegación del robot en zonas cubiertas. Las ecosondas por lo general se usan para la cartografía del fondo marino; sin embargo, cuando son revertidas –es decir, cuando son dirigidas hacia el fondo del hielo– también pueden servir para el mapeo de la morfología del hielo bajo el agua, lo cual ayuda a la navegación. De manera similar, un medidor hidroacústico de corrientes, si es revertido, puede medir la velocidad relativa entre el vehículo y el hielo. Esta variable, combinada con la información de los sensores de movimiento, ayuda al vehículo a estimar su posición bajo la banquisa.

■ **Algunos registros obtenidos**

■ En el futuro, se perfila un océano Ártico más dinámico: con mayor movimiento, más calor y menos

Recuadro 2. Robots bajo el hielo de mar

El hielo es un obstáculo natural para la navegación segura de los vehículos submarinos autónomos. Para orientar su navegación y enviar la información recolectada durante los sondeos, los robots utilizan la red GPS y las constelaciones satelitales, como la red Iridium o Starlink. Las señales transmitidas por los satélites (microondas) se absorben y dispersan rápidamente en el agua penetrando sólo algunos centímetros bajo la superficie. Por lo tanto, estos robots se ven forzados a emerger para obtener las coordenadas geográficas de su posición y transmitir los datos científicos registrados.

Ciertos sectores del océano Ártico se encuentran libres de hielo durante pocos meses al año. El resto del tiempo, la banquisa (capa de hielo marino) impide a los vehículos el acceso a la superficie. Para evadir el hielo, los robots tienen dos opciones: permanecer bajo el agua durante meses o encontrar zonas descubiertas para emerger. La segunda opción requiere el desarrollo de tecnologías fiables para la detección del hielo de mar y nuevos protocolos de navegación bajo la banquisa. De esta manera, las operaciones de registro de datos no serían interrumpidas, ni por la presencia de hielo ni por la noche ártica.



Figura 3. Operaciones de lanzamiento y recuperación de planeadores submarinos a bordo del rompehielos científico Amundsen, en la Bahía de Baffin, Canadá. Fuente: Laboratorio Takuvik.

hielo; más parecido a los de latitudes menores. Debido al aumento en la temperatura del aire, una constante reducción del hielo marino en el periodo estival contribuye al cambio de la estructura interna del océano. El uso de vehículos autónomos submarinos ha aportado información relevante para empezar a comprender este fenómeno.

Los planeadores submarinos son particularmente útiles para el muestreo de grandes volúmenes de agua en el mar de Barents, ubicado en la cuenca Euroasiática del este (véase la Figura 3). Estos robots registran las variables fundamentales para los estu-

dios oceanográficos de la región, como la salinidad y la temperatura en diferentes profundidades. Debido a la ausencia de hielo, recientemente se ha constatado que hay una reducción de la capa haloclina, la cual es una capa de la columna de agua en la que la salinidad cambia rápidamente con la profundidad. Muy cerca de la superficie (40-200 m), esta capa aísla al hielo marino de la influencia de otras franjas de agua más profundas. Como consecuencia de esta disminución, la masa de agua atlántica, que viaja bajo la capa haloclina, transmite su calor a la superficie. Este evento puede acelerar aún más la desaparición

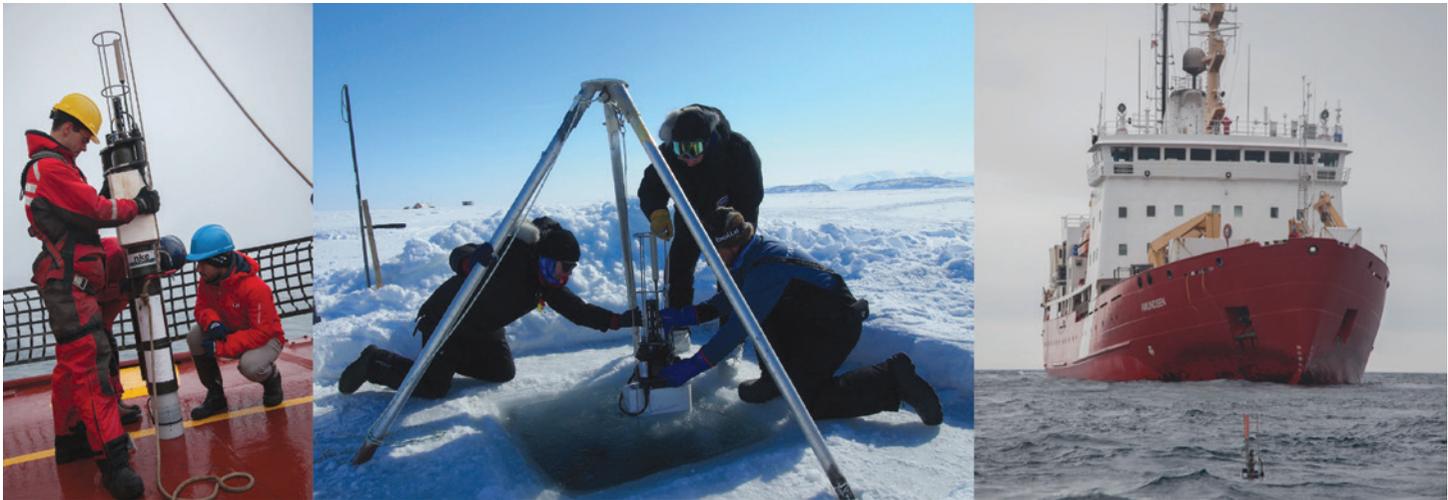


Figura 4. *Izquierda:* preparación de un flotador biogeoquímico Argo para su lanzamiento. *Centro:* un flotador es liberado a partir de la banquisa. *Derecha:* un flotador emerge en un área libre de hielo. Fuente: Pascaline Bourgain y Claudie Marec.

de la banquisa durante el periodo estival en el Ártico. El fenómeno se conoce como la Atlantificación del océano Ártico del este (Polyakov y cols., 2020).

De forma similar, en la cuenca Amerasiana, la información recolectada por planeadores submarinos ha servido para formar series temporales de la región. Se ha observado que las aguas del océano Pacífico comienzan a fluir más allá del estrecho de Bering, y este influjo, que transporta consigo especies y nutrientes del sur, se mezcla posteriormente con el mar de Chukchi en el océano Ártico del oeste. La borealización, como se llama al influjo de océanos subárticos hacia las cuencas Euroasiática y Amerasiana del océano Ártico, ilustra la delicadeza del ecosistema frente a la fuerza del cambio climático.

El océano Ártico es el hogar de una comunidad importante de seres vivos, desde microbios hasta mamíferos. Estos organismos dependen de la producción primaria de biomasa vegetal por parte de algas marinas microscópicas que transforman energía y materia inorgánica en materia orgánica (mediante la fotosíntesis); dicha energía viene principalmente de la luz solar. Debido al aumento en la temperatura de la región, una menor cobertura de hielo en la superficie resulta en una mayor cantidad de luz al interior del océano, lo cual es aprovechado por los organismos fotosintéticos. De igual manera, se ha identificado un aumento de nutrientes inorgánicos en algunas regiones de este océano, como resultado

de la borealización. En consecuencia, la producción primaria de los organismos fotosintéticos creció 57% entre 1998 y 2018 (Lewis y cols., 2020). Esto se atribuye a la reducción del hielo, a un aumento en la concentración de clorofila-a (pigmento fotosintético y tipo de clorofila más abundante) y al influjo de nutrientes inorgánicos (Babin, 2020).

Los vehículos flotadores biogeoquímicos, adaptados a las condiciones polares, miden la cantidad de nitratos, clorofila-a, materia orgánica disuelta y oxígeno disuelto, así como los niveles de radiación solar en la columna de agua. Estos robots forman parte de la exitosa red mundial de flotadores Argo, que cuenta con casi 4 000 unidades que actualmente están registrando datos científicos en los océanos del mundo (Le Traon y cols., 2020). En el último lustro, estos vehículos se han convertido en un apoyo importante para la ciencia polar (véase la Figura 4). Los datos que envían indican la presencia de florecimientos masivos de fitoplancton bajo el hielo y también han registrado una constante actividad orgánica durante la noche ártica (Randelhoff y cols., 2020). En el invierno polar, los niveles de luz son tan bajos que, antes de estos estudios, se consideraba que toda actividad orgánica básica permanecía durmiente durante dicho periodo; pero aún es temprano para predecir las consecuencias de un crecimiento sostenido de la producción primaria en esta región, por lo que se necesitan más observaciones.



Figura 5. *Izquierda:* lanzamiento del vehículo autónomo autopropulsado Explorer para una misión de cartografía, a partir de un campamento de hielo, cerca de la isla Borden en el alto Ártico canadiense. Fuente: Don Glencross, DRDC-Atlantic. *Derecha:* recuperación de un vehículo autónomo submarino autopropulsado por el buque CCGS Louis, St-Laurent en el área de Sever Spur, en la cuenca Ártica canadiense. Fuente: Fisheries and Oceans Canada.

Robots que escuchan el ambiente marino Ártico

Los estudios acústicos en el océano Ártico también están caracterizados por la presencia de hielo en la superficie. El hielo de mar no es un fenómeno estático: responde al viento, a las corrientes, al estrés térmico y al oleaje. Durante el invierno y la primavera, el ambiente acústico está dominado por la deformación y la fractura de la banquisa en movimiento, por lo que los sonidos abruptos de ruptura de hielo y el choque entre las placas son un interesante objeto de estudio, debido a que están relacionados con la climatología local. Durante los meses de verano, los niveles de sonido causados por las actividades humanas ocurren de manera cada vez más frecuente en zonas libres de hielo. Así, el campo sonoro submarino en el Ártico varía ampliamente con las estaciones, con los movimientos de la banquisa y según la ubicación geográfica.

Los planeadores submarinos y flotadores en la región se adaptan mediante la integración de módulos de monitoreo acústico. Estas mejoras permiten detectar y clasificar sonidos; también proporcionan las escalas temporales y geográficas adecuadas para representar la variabilidad del campo acústico mari-

no en el Ártico. En los datos registrados, es posible percibir las variaciones tonales de diferentes tipos de mamíferos marinos y documentar su distribución, además de contabilizar el tráfico marítimo y monitorear las actividades del sector industrial. El monitoreo acústico por medio de vehículos autónomos submarinos ha permitido relacionar el comportamiento biológico de las especies endémicas y migratorias con algunas de las variables físicas del océano. Por ejemplo, se ha logrado correlacionar la cadencia de los llamados y cantos de algunas variantes de ballenas, focas y morsas, con la salinidad en la superficie del agua (Baumgartner y cols., 2014). También se han registrado vocalizaciones de estos mamíferos marinos mientras siguen el borde de la banquisa en sus rutas migratorias (Worcester y cols., 2020).

La Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (Conmevar) permite la revisión de los límites marítimos de los países que la han firmado y ratificado. Si la plataforma continental de un país se extiende más allá del límite de la zona económica exclusiva —es decir, más de 200 millas náuticas a partir de la costa—, los Estados pueden solicitar la extensión de sus fronteras marítimas. De ser apro-

bada la petición, el país solicitante tendría derecho exclusivo sobre el uso del suelo y subsuelo dentro de la zona extendida. Noruega, Rusia, Canadá y Dinamarca presentaron peticiones individuales ante la Comisión de Límites de la Plataforma Continental de la Conmevar concernientes a la extensión de sus fronteras marítimas en el océano Ártico.

Cualquier Estado que pretenda tener éxito en este proceso debe presentar una petición sostenida en la información técnica y un análisis científico riguroso; por este motivo, durante las últimas dos décadas, los países mencionados han hecho uso de vehículos submarinos autopropulsados para cartografiar de manera detallada el fondo marino Ártico. Estos robots han operado en zonas donde la presencia de hielo es aún perenne y el acceso resulta extremadamente limitado o imposible (véase la Figura 5). Dichos estudios tienen una influencia importante en la definición de nuevas fronteras para las naciones árticas, así como en la consolidación de la ciencia como una alternativa en los retos diplomáticos mundiales (Sovereignty y UNCLOS, 2019).

Las actividades humanas en esta región han aumentado de una manera considerable. Para los países del Círculo Polar Ártico, la capacidad de garantizar la seguridad de sus intereses y la soberanía sobre sus territorios es primordial. Por ello, la defensa es un sector que también aprovecha la versatilidad de los vehículos submarinos autónomos y los emplea de manera sistemática para la prevención de riesgos para la seguridad territorial. Los países árticos usan planeadores submarinos y vehículos autopropulsados en actividades de reconocimiento e inteligencia, en el apoyo al combate contra la pesca ilegal y el contrabando, en el monitoreo de zonas protegidas y, en caso necesario, en la protección de las fronteras marítimas.

José Luis Lagunas Morales

Centro de Investigaciones del Atlántico, Departamento Nacional de la Defensa Canadiense.
Jose.Lagunas@drdc-rddc.gc.ca

Referencias específicas

Babin, M. (2020), "Climate change tweaks Arctic marine ecosystems", *Science*, 369:137-138.

Baumgartner, M. et al. (2014), "Glider-based passive acoustic monitoring in the Arctic", *Mar. Technol. Soc. J.*, 40:40-51.

Lagunas, J. et al. (2018), "Sea-ice detection for autonomous underwater vehicles and oceanographic lagrangian platforms by continuous-wave laser polarimetry", *Ocean Sens. Monit.* X, 10631:106310W.

Le Traon, P-Y. et al. (2020), "Preparing the New Phase of Argo: Scientific Achievements of the NAOS Project", *Front. Mar. Sci.*, 7:838.

Lewis, K. et al. (2020), "Changes in phytoplankton concentration now drive increased Arctic Ocean primary production", *Science*, 369:198-202.

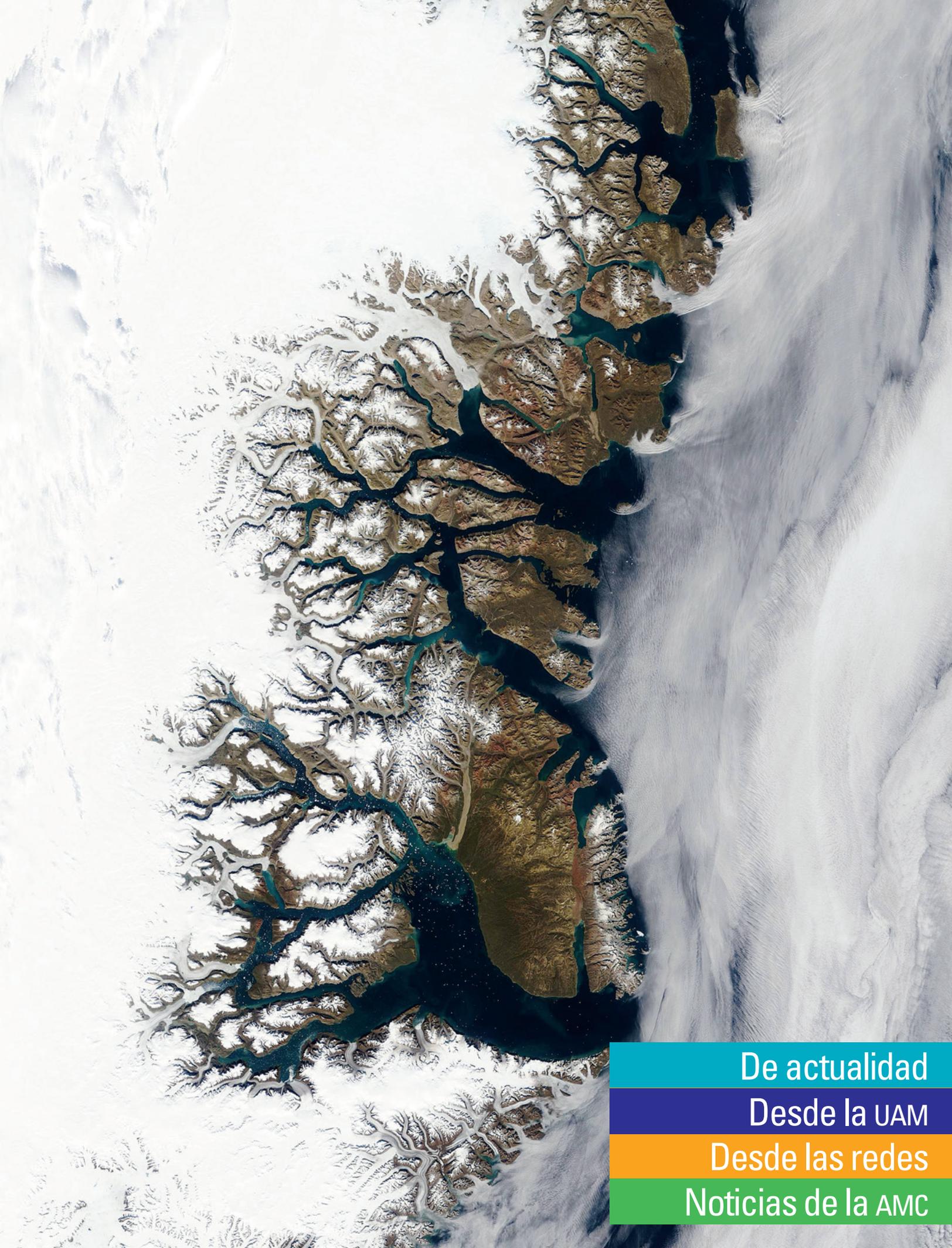
National Snow and Ice Data Center (2020), "Sea Ice Index", *NSIDC*. Disponible en: <https://nsidc.org/data/seaice_index>, consultado en noviembre de 2020.

Polyakov, I. et al. (2020), "Borealization of the Arctic Ocean in Response to Anomalous Advection From Sub-Arctic Seas", *Front. Mar. Sci.*, 7:491.

Randelhoff, A. et al. (2020), "Arctic mid-winter phytoplankton growth revealed by autonomous profilers", *Science Advances*, 6(39): en línea.

Sovereignty y UNCLOS (2019), "Defining Canada's Extended Continental Shelf", *Government of Canada*. Disponible en: <<https://www.dfo-mpo.gc.ca/science/hydrography-hydrographie/UNCLOS/index-eng.html>>, consultado en noviembre de 2020.

Worcester, P. et al. (2020), "Ocean Acoustics in the changing Arctic", *Acoustics Today*, 16:55.



De actualidad
Desde la UAM
Desde las redes
Noticias de la AMC