



Tema Central

Perspectivas estratégicas del sensorio cuántico en el entorno submarino y sus implicaciones oceanopolíticas

Strategic Perspectives of Quantum Sensing in the Submarine Domain and its Oceanopolitical implications

Carlos Uendel de Souza Vituriano¹, Lia da Graça² y
Fernando-Manuel Araújo-Moreira³

Recibido: 2 de marzo de 2026

Aceptado: 5 de abril de 2026

Publicado: 31 de mayo de 2026

Resumen

Introducción: este artículo parte de la premisa de que la denominada “segunda revolución cuántica” está reconfigurando las bases tecnológicas del poder marítimo, y que el dominio submarino se consolida como un espacio estratégico emergente en el marco de la denominada “guerra de los fondos marinos” y de la oceanopolítica contemporánea. **Objetivo:** clasificar jerárquicamente y analizar el estado del arte y las principales tendencias del sensorio cuántico aplicado al ambiente submarino entre 2018 y 2025, con foco en las dimensiones técnicas, estratégicas y oceanopolíticas. **Metodología:** la revisión de alcance identifica las tecnologías recientes de sensorio cuántico. A partir de esta revisión se realizó un análisis estratégico-oceanopolítico orientado a definir posibles escenarios de futuro en este campo. **Conclusiones:** los resultados indican que los magnetómetros OPM presentan la trayectoria más prometedora en términos de madurez tecnológica (TRL). El sensorio cuántico tenderá a complementar las capacidades clásicas de vigilancia submarina, prospección mineral y protección de infraestructuras críticas. Su desarrollo posee una elevada motricidad estratégica en las disputas oceanopolíticas. Finalmente, la ocupación cognitiva del entorno marítimo experimentará transformaciones, con implicaciones para la gobernanza oceánica.

Palabras clave: escenarios futuros; fondos marinos; magnetometría cuántica; oceanopolítica; seguridad marítima; sensores cuánticos

Abstract

Introduction: This article is based on the premise that the so-called “Second Quantum Revolution” is reshaping the technological foundations of maritime power, and that the underwater domain is consolidating as an emerging strategic space within the framework of the so-called “Seabed Warfare” and contemporary oceanopolitics. **Objective:** To hierarchically classify and analyze the state of the art and key trends in quantum sensing applied to the underwater environment between 2018 and 2025, with a focus on technical, strategic, and political maritime dimensions. **Methodology:** A scoping review was conducted to identify recent quantum sensing technologies. Based on this review, a strategic maritime political analysis was carried out to define possible future scenarios in this field. **Conclusions:** The results indicate that OPM magnetometers present the most promising trajectory in terms of technological maturity (TRL). Quantum sensing is expected to complement classical capabilities in underwater surveillance, mineral prospecting, and the protection of critical infrastructure. Its development has a high level of strategic relevance in oceanopolitical disputes. Finally, the cognitive occupation of the maritime environment will undergo transformations, with implications for ocean governance.

Keywords: future scenarios; maritime security; oceanopolitics; quantum magnetometry; quantum sensors; seabed

¹ Marinha do Brasil, Escola de Guerra Naval, uendel@marinha.mil.br, orcid.org/0009-0003-9870-6166

² Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), Escuela Politécnica Superior (UA), Brasil, lia.graca@ua.es, lia.graca@unifesp.br, orcid.org/0000-0003-0254-0599

³ Exército Brasileiro, Instituto Militar de Engenharia (IME), fernando.manuel@ime.eb.br, orcid.org/0000-0002-5423-0405

Introducción

Los estudios prospectivos no pretenden predecir el futuro, sino favorecer el análisis de tendencias, incertidumbres, rupturas y diferentes tipos de señales observables en el presente que pueden conducir a diversos caminos plausibles, y permitir a las instituciones prepararse para esos posibles futuros. Con estos estudios es posible identificar en el presente oportunidades para influir en el futuro a su favor o limitar los efectos negativos. La actitud prospectiva tiene como objetivo mirar hacia el futuro de manera amplia para identificar las tendencias importantes y prestar atención a sus interacciones (Marcial y Grumbach 2008, 27).

En este sentido, la Unión Europea (UE) fue pionera en realizar estudios prospectivos¹ sobre las tecnologías cuánticas en 2016 y desarrolló la primera *Quantum Technology Roadmap* (2016).² Cuando se debate el desarrollo de las tecnologías cuánticas, a menudo las discusiones estratégicas sobre defensa y seguridad se limitan a la cuestión del desarrollo del ordenador cuántico, como se observa en la Estrategia de Seguridad Nacional de los Estados Unidos de América (2025, 9 y 21) o en la Estrategia Nacional de Defensa de Brasil (2025). Sin embargo, es fundamental tener en cuenta otras áreas, como la detección cuántica, la comunicación y la simulación cuánticas. Debido a la necesidad de ampliar el conocimiento de los océanos y la capacidad cognitiva de este entorno —incluidos los fondos marinos—, así como las aplicaciones de defensa y seguridad marítima en el ámbito submarino y sus impactos oceanopolíticos, surgen nuevas perspectivas asociadas al empleo de tecnologías de detección cuántica submarina. De este modo, el problema de investigación consiste en identificar tendencias estratégicas de futuro con implicaciones oceanopolíticas, derivadas del mapeo del sensorio cuántico submarino, el cual se configura como una laguna de conocimiento. Por lo tanto, con este trabajo se busca cubrir esta laguna e iniciar un debate sobre la importancia estratégica de este tema y sus implicaciones en la oceanopolítica,³ un área que ha experimentado avances significativos en diferentes actores internacionales, especialmente en China y los Estados Unidos de América (EE. UU.).

Se encuentran más frecuentemente publicaciones científicas acerca de guerra antisubmarina (ASW). Todavía, desde el punto de vista estratégico y oceanopolítico, resulta más

1 Resulta pertinente un estudio prospectivo como el realizado por la UE en 2016, sobre soluciones a las barreras físicas para emplear sensores acústicos submarinos que utilizan la física clásica, como la absorción, la dispersión, el *scattering*, el *bottom loss*, la refracción por gradientes de velocidad del sonido y muchos otros efectos, cuyo estudio no es el propósito de este artículo.

2 Trata de las inversiones en todas las áreas cuánticas y consolida el concepto de “segunda revolución cuántica”. Los sensores cuánticos de segunda generación inician una nueva fase de aplicaciones fuera del entorno laboratorio con uso en entornos operativos reales, gracias a los avances técnicos, procesamiento de señales e inteligencia artificial (IA), entre otras áreas. Estos desarrollos e inversiones financieras multimillonarias (Corrêa 2025) explican el aumento de experimentos y artículos publicados en los últimos años.

3 Se entiende por oceanopolítica, la política del Estado como actor central en la toma de decisiones soberanas en relación con los espacios oceánicos, el destino de su población y las relaciones de poder con otros Estados, así como, en el contexto de la coyuntura político-estratégica internacional, con los demás actores del sistema internacional (Barbosa Júnior 2009, 62). En nuestra interpretación se refiere al conjunto de disputas estratégicas, normativas y tecnológicas vinculadas al control, explotación y gobernanza de los espacios marítimos y sus infraestructuras.

relevante desarrollar sensores cuánticos submarinos que, aun instalados en la costa, en plataformas marítimas o en el fondo del mar, permitan el monitoreo continuo de los fondos marinos y de las infraestructuras submarinas críticas, con especial atención a los cables submarinos, objeto de la denominada “guerra de los fondos marinos”. Estas tecnologías presentan además un claro potencial de doble uso, particularmente en la prospección de minerales raros y de yacimientos petrolíferos en aguas profundas.

Adicionalmente, podrían aplicarse para detectar medios submarinos antropogénicos, identificar radiación nuclear y monitorizar micro y nanopartículas, materiales químicos tóxicos y bioinvasores marinos. Su implementación contribuiría tanto a proteger la biodiversidad marina como a generar beneficios económicos y sociales, reforzando simultáneamente la seguridad marítima y la defensa de infraestructuras submarinas críticas. Esto configura nuevas formas relevantes de ocupación cognitiva del dominio marítimo.

Los objetivos de este trabajo son realizar una dialéctica entre el nivel técnico y el estratégico, de forma integrada, considerando la oceanopolítica, con el fin de identificar, mapear, clasificar, analizar y sintetizar críticamente los avances en sensores cuánticos en el contexto de la segunda revolución cuántica, en aplicaciones militares navales y civiles en el ámbito submarino, en el período de 2018 a 2025. Para ello, se formularon las siguientes preguntas: ¿Cuál es el nivel actual de desarrollo tecnológico de la detección cuántica aplicada al entorno submarino, considerando el período de 2018 a 2025? ¿Qué tecnologías o herramientas son más prometedoras desde el punto de vista oceanopolítico? De manera general, ¿cómo se interrelacionan y se influyen mutuamente las tendencias y las fuerzas motrices, teniendo en cuenta el contexto de la disputa geopolítica u oceanopolítica, para el desarrollo de sensores cuánticos submarinos? ¿Qué factor o evento tiene mayor motricidad, es decir, mayor influencia?

Marco teórico

Comprender el espacio marítimo exclusivamente desde la geopolítica tradicional resulta insuficiente para captar la complejidad de las dinámicas contemporáneas en el dominio oceánico. Desde esta perspectiva, el concepto de oceanopolítica emerge como una ampliación analítica que incorpora no solo la dimensión territorial del mar, sino también su carácter funcional como espacio de proyección del poder, de explotación de recursos y de interacción estratégica (Martínez Busch 1993).

Desde esta perspectiva, el mar deja de ser concebido como un mero medio de tránsito o un espacio vacío, para entenderse como un “territorio oceánico” que incluye la superficie, la columna de agua, el lecho y el subsuelo marino. Esta concepción implica la necesidad de una “ocupación efectiva” del espacio marítimo a través de capacidades tecnológicas, cognitivas y operativas que permitan conocerlo, monitorearlo y controlarlo (Martínez Busch 1993, 218-230).

En este marco, la oceanopolítica articula intereses nacionales, poder marítimo y desarrollo, al establecer un vínculo directo entre la capacidad de un Estado para conocer su

entorno oceánico y su capacidad para ejercer soberanía y proyectar influencia. En este sentido, la detección cuántica submarina permite la “ocupación cognitiva” del espacio marítimo submarino, algo impensable si solo se emplearan tecnologías de detección clásicas, lo que permite generar nuevos conocimientos sobre el ámbito submarino y sus dinámicas, algo que antes era imposible.

La creciente importancia económica de las infraestructuras submarinas, como las plataformas marítimas, en el caso de Brasil y, en particular, en Guayana, introduce una nueva dimensión en la geopolítica de los océanos, incluidas las disputas por zonas marítimas, como en la costa adyacente a la región de Esequibo. Además, teniendo en cuenta la conectividad global, los cables submarinos de fibra óptica se destacan como infraestructuras críticas, responsables de alrededor del 99 % de la transmisión internacional de datos, sin las cuales las transacciones económicas globales se verían drásticamente afectadas.

Estas estructuras, que se extienden a lo largo de miles de kilómetros en el fondo marino, aunque estén enterradas en su mayor parte, presentan vulnerabilidades, sobre todo en las zonas costeras donde no están enterradas, lo que las hace especialmente sensibles en contextos de competencia estratégica. En este sentido, el control, la protección y la vigilancia de estas infraestructuras se convierten en una prioridad estratégica para los Estados (Capri 2024).

Las interacciones entre la tecnología, la gobernanza oceánica y el derecho internacional del mar ponen de manifiesto que, en la actualidad, el dominio del mar se ve cada vez más condicionado por capacidades tecnológicas avanzadas. Hay potencial intrínseco, por lo tanto, de que estas nuevas tecnologías, si de facto operacionalizables, puedan ampliar el conocimiento del espacio marítimo, mejorar la gestión de los recursos marítimos y, en última instancia, reforzar la soberanía. Paralelamente, la defensa de los países de América Latina puede verse beneficiada, dado que sus principales fronteras son los mares.

Es recomendable tener en cuenta que se trata de capacidades aún en fase de desarrollo y, por supuesto, sujetas a validación experimental en condiciones operativas reales. Entonces, el desarrollo de estos tipos de sensores puede permitir detectar variaciones sutiles en el entorno submarino. Este potencial, de confirmarse, tenderá a contribuir a mejorar el alcance, la sensibilidad y la precisión de las actividades de vigilancia, con implicaciones relevantes para comprender y gestionar el espacio marítimo, de acuerdo con el concepto de “ocupación efectiva” del espacio oceánico establecido en la literatura sobre política oceánica (Martínez Busch 1993, 218). Teóricamente, estos desarrollos pueden interpretarse como una nueva forma de poder marítimo estatal, ya que amplían la capacidad de control sobre las aguas jurisdiccionales, en particular a partir de la generación de información estratégica.

Con el fin de analizar las tendencias futuras de impacto oceanopolítico derivadas de las tecnologías de sensorio cuántico, se empleó el marco teórico del *Handbook of Technology Foresight: Concepts and Practice* (Popper 2008, 44-88). Este enfoque incorpora

el denominado “diamante prospectivo”, el cual organiza los métodos según el tipo de conocimiento involucrado: empírico-creativo, basado en evidencia científica, basado en competencia individual y derivado de la interacción entre especialistas. Además, se incorporó el *Cenários prospectivos: como construir um futuro melhor* (Marcial y Grumbach 2008, 37-38, 56, 87-88, 93 y 128-129), que aborda la matriz de impactos cruzados en los estudios de futuro, e identifica que los eventos siempre poseen algún grado de motricidad y dependencia para influir en el futuro, así como las tendencias de peso, es decir, aquellas variables que marcarán la pauta y que no pueden dejar de ser consideradas en cualquier estudio de futuro.

Metodología

El diseño del estudio comprende tres etapas sucesivas:

1. Una revisión exhaustiva de la literatura científica (que incluye un análisis bibliométrico). Esta revisión sigue el protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses).
2. un análisis comparativo entre las tecnologías, seguido del análisis de las consecuencias estratégicas dinámicas y de las transformaciones geopolíticas. La comparación de tecnologías se justifica por los distintos grados de madurez tecnológica, tanto en el ámbito científico como en el de la ingeniería (Acín et al. 2018, p. 13). En conjunto con la bibliometría⁴, esta revisión ha permitido identificar lagunas de conocimiento;
3. un enfoque de prospectiva estratégica, que contempla posibles futuros como consecuencia del desarrollo y la aplicación de las mencionadas.

Además, la revisión de la bibliografía especializada en defensa y seguridad no ha revelado estudios que aborden exclusivamente las tecnologías de detección cuántica aplicables al entorno marino, con la única excepción de un trabajo bastante específico y de alcance limitado sobre la guerra (Nathan 2023).

Así, mediante un enfoque analítico-interpretativo destinado al examen crítico del estado actual de estas tecnologías, y comprendiendo su impacto estratégico, este trabajo avanza en la evaluación de las dinámicas de poder, las capacidades estatales y la gobernanza marítima; además, articula los hallazgos técnicos con sus implicaciones estratégicas y oceanopolíticas.

4 La bibliometría ha resultado útil para identificar la inversión estatal en este campo y para observar a sus principales actores tecnológicos, en el contexto de una integración progresiva de capacidades (submarinas, terrestres, aéreas, cibernéticas/cognitivas y espaciales), en las denominadas “operaciones multidominio”, en las que los sistemas de sensorización se configuran como herramientas de superioridad cognitiva, acelerando los procesos de toma de decisiones (Black et al. 2022).

Resultados y discusión

Resultados

En primer lugar, se identifican y clasifican las principales familias tecnológicas, a lo que sigue un análisis comparativo de su nivel de madurez y de las aplicaciones descritas en la bibliografía.

Los resultados detallan los dispositivos más recurrentes en la producción científica analizada, el nivel actual de madurez tecnológica (TRL) en los diferentes enfoques y la identificación de los tipos de dispositivos con mayor potencial de transición hacia el uso operativo. Se observa un crecimiento más marcado de las publicaciones a partir de 2023, con predominio de estudios centrados en sensores de tipo OPM y con una fuerte presencia de producción de origen chino. Además, los trabajos relacionados con los sensores OPM presentan, en general, un mayor impacto científico en comparación con el resto de las tecnologías identificadas.

En el contexto de la teledetección cuántica aplicada al ámbito submarino, se identificaron tecnologías de gravimetría e interferometría cuántica basadas en átomos fríos, tecnologías de magnetometría cuántica orientadas al entorno submarino. Los principales dispositivos asociados a cada uno de estos grupos se resumen en la tabla 1. Como limitación de este trabajo, no se ha considerado la teledetección cuántica, que presenta otras perspectivas que podrían ser objeto de futuros estudios.

La clasificación presentada en la tabla 1 permite identificar las principales familias tecnológicas que se investigan actualmente para la detección cuántica submarina. A partir de esta tipología, resulta relevante analizar estas soluciones y sus posibles aplicaciones en el entorno submarino, con el fin de comprender qué enfoques presentan un mayor grado de desarrollo y potencial de transición para su uso operativo. Este resumen se presenta en la tabla 2. En cuanto a las implicaciones oceanopolíticas y sus perspectivas estratégicas futuras, los principales resultados se pueden resumir de forma jerárquica en la tabla 3.

Tabla 1. Tecnologías de detección cuántica submarina identificadas

Grupo	Categoría tecnológica	Tecnología principal	Observación
A	Gravimetría / Interferometría cuántica	Gravímetros de átomos fríos	Detección de variaciones gravitacionales submarinas
B1	Magnetometría basada en NV	Magnetómetros basados en centros NV en diamante (<i>Center Diamond Magnetometers</i>)	Centros de vacancia de nitrógeno en diamante
B2	Magnetometría atómica	Magnetómetros bombeados ópticamente (<i>Optically Pumped Magnetometers</i> , OPM)	Arreglos de magnetómetros atómicos
B3	Magnetometría superconductora	Dispositivos superconductores de interferencia cuántica (<i>Superconducting Quantum Interference Device SQUIDS</i>)	Arreglos de sensores superconductores

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Madurez tecnológica y aplicaciones del sensorio cuántico submarino en orden jerárquica TRL

Tecnología	Nivel TRL ¹ aproximado	Aplicaciones submarinas potenciales	Actualización tecnológica
1. Magnetómetros OPM	6-8	Detección magnética submarina; inspección no destructiva de estructuras conductoras; navegación submarina pasiva; monitorización geofísica superficial; aplicaciones duales (energía/defensa). Guerra antisubmarina en confirmación de posicionamiento, monitorización magnética de área amplia. Posibilidad de evolucionar hacia la detección de medios antropogénicos submarinos (AUV y submarinos), cables submarinos e infraestructuras críticas.	Funcionamiento a temperatura ambiente. Información vectorial
2. SQUID	5-7 con uso consolidado en otras aplicaciones	Detección magnética de alta sensibilidad; monitoreo de yacimientos petrolíferos y gasíferos; detección de estructuras metálicas submarinas; investigación geofísica profunda; aplicaciones navales y de defensa.	Sensibilidad extrema
3. Gravímetros de átomos fríos	3-5	Cartografía del fondo oceánico, detección de cavidades y estructuras geológicas. Prospección de petróleo y minerales en alta mar, monitorización tectónica, estudios oceanográficos, cartografía y aplicaciones militares.	Alta precisión gravimétrica
4. Magnetómetros NV	3-4	Magnetometría vectorial submarina; monitorización geomagnética del fondo oceánico; detección de corrientes eléctricas marinas; sensores combinados (campo magnético + temperatura); instrumentación científica en el fondo marino; potencial para la inspección de infraestructuras submarinas. Biosensores marinos. Posibilidad de evolucionar hacia la detección de medios antropogénicos submarinos (AUV y submarinos), cables submarinos e infraestructuras críticas.	Funcionamiento a temperatura ambiente. Información vectorial

Fuente: elaboración propia.

- 1 TRL (Technology Readiness Level) es una escala estandarizada de madurez tecnológica que se utiliza para indicar lo cerca que está una tecnología de su aplicación operativa real. En este caso, consideramos el uso de los sensores mencionados en el ámbito submarino.

Tabla 3. Síntesis de los resultados oceanopolíticos y sus perspectivas estratégicas futuras

	Implicación oceanopolítica (qué permitirá hacer)	Importancia estratégica (qué cambiará)	Herramienta cuántica submarina	Tipo de semilla de futuro ¹
1	Ampliará la capacidad de consciencia situacional submarina, fundamental para la guerra dos fondos marinos, monitoreando más eficazmente las infraestructuras submarinas y medios antropogénicos.	Mitigará las capacidades de guerra híbrida en el dominio submarino y podría constituir una revolución en los asuntos militares en ese dominio.	Gravímetros / NV Centers / OPM	Tendencia de peso
2	Permitirá reducir la laguna de conocimientos del océano y fondos marinos, con implicaciones en gobernanza dos océanos.	Permitirá avanzar en el desarrollo de la legislación internacional sobre el uso de los océanos.	Todos	Hecho portador de futuro ²
3	Tendrá un papel decisivo en la ampliación de la capacidad de prospección mineral submarina, con implicaciones potenciales para intensificar las disputas territoriales en los fondos marinos, en función de la explotación de minerales raros.	Permitirá descubrir nuevos yacimientos submarinos y ampliará la capacidad actual de explotación submarina, reduciendo la relevancia relativa de los yacimientos terrestres.	Gravímetros / NV Centers / OPM	Sorpresa inevitable ³
4	Permitirá ampliar la capacidad de biotecnología marina con potencial para transformar el aprovechamiento económico de los océanos y su monitoreo ambiental.	Fortalecerá la importancia estratégica de la economía azul para los países latinoamericanos y contribuirá a mitigar las pérdidas económicas y sociales de las poblaciones que dependen del mar.	NV Centers	Hecho portador de futuro

Fuente: elaboración propia.

- 1 La semilla de futuro se define como una tendencia con potencial de germinación, que puede o no materializarse, y que puede clasificarse en invariantes, tendencias de peso, elementos predeterminados, sorpresas inevitables, hechos portadores de futuro y wild cards (Marcial y Grumbach 2008, 56).
- 2 Hecho portador de futuro se trata de señales ínfimas en su dimensión actual, presentes en el entorno, pero de gran magnitud en cuanto a sus consecuencias y potencialidades (Marcial y Grumbach 2008, 58).
- 3 La sorpresa inevitable se define como una fuerza previsible cuyas raíces ya se encuentran en operación en la actualidad, aunque se desconoce el momento de su configuración, así como la naturaleza de sus consecuencias y sus efectos potenciales (Marcial y Grumbach 2008, 59).

Discusión

Esta subsección desarrolla la discusión de cada tecnología, junto con sus implicaciones operacionales en el período 2018-2025, las cuales se sintetizan de manera analítica en la tabla 4.

Tabla 4. Síntesis de capacidades de los sensores cuánticos submarinos y sus implicaciones operacionales en oceanopolítica y defensa

Sensor	Definición	Limitaciones	Ventajas	Implicaciones operacionales
Gravímetros	Emplean la interferometría de átomos, es decir, utilizan la interferencia entre ondas coherentes de materia. Miden la aceleración de la gravedad en un lugar definido, que varía espacialmente en función de la densidad subterránea o temporalmente por cambios de densidad antropogénicos o geofísicos.	Alta sensibilidad a las vibraciones y aceleraciones del barco/plataforma; sistemas aún voluminosos; elevado consumo energético; complejidad del control del láser y del vacío; coste elevado; integración limitada en AUV/ROV.	Medidas absolutas (sin calibración recurrente); altísima estabilidad a largo plazo; baja deriva; sensibilidad superior a la de los gravímetros clásicos; operación pasiva y furtiva.	Permiten cartografiar estructuras geológicas y cavidades submarinas con alta precisión, impactando directamente en la prospección de petróleo, minerales críticos y recursos estratégicos. En el plano oceanopolítico, refuerzan disputas por delimitación, explotación y control de áreas profundas más allá de la jurisdicción nacional. Así, permiten ampliar el conocimiento y monitoreo de los fondos marinos. Estas tecnologías podrían resultar disruptivas para la defensa, en la medida en que su desarrollo y eventual empleo en la guerra antisubmarina (ASW) limitaría significativamente la eficacia de las contramedidas, con el potencial de transformar las capacidades de guerra antisubmarina.
SQUID	Es un dispositivo superconductor basado en junturas Josephson, que funciona a temperaturas criogénicas y es capaz de detectar variaciones extremadamente pequeñas del campo magnético mediante la interferencia cuántica del flujo magnético.	Necesidad de refrigeración cercana a 0 kelvin. Mayor complejidad logística en alta mar; sensible a campos magnéticos intensos; elevado coste operativo. Limitado a plataformas fijas o móviles de grandes dimensiones.	Sensibilidad extrema (fT-aT); excelente respuesta en bajas frecuencias; tecnología madura en geofísica; eficaz para grandes profundidades y estructuras enterradas.	Ofrecen sensibilidad extrema para la prospección geofísica profunda y la detección de estructuras enterradas, reforzando las capacidades estatales de exploración minera <i>offshore</i> . Sin embargo, su dependencia de la criogenia restringe el uso a plataformas fijas o de gran porte, limitando su aplicación operativa/militar y, además, reduciendo su influencia oceanopolítica.

Tabla 4. (continuación)

Sensor	Definición	Limitaciones	Ventajas	Implicaciones operacionales
NV Center	Es un “defecto” en un punto de la estructura cristalina de un diamante, donde hay un átomo de nitrógeno y un espacio vacío adyacente, que constituye ese “defecto”. Esta situación permite que el centro NV tenga un espín de electrón, que está polarizado ópticamente y que puede controlarse mediante microondas, lo que permite la lectura.	Tecnología aún emergente; sensibilidad inferior a SQUID en bajas frecuencias; necesidad de un control óptico preciso; retos de encapsulación y robustez a largo plazo en ambiente salino.	Funciona a temperatura ambiente; sensores compactos y robustos; bajo consumo; posibilidad de detección multimodal; alta resolución espacial; compatible con plataformas autónomas.	Permiten una detección vectorial precisa y miniaturizada, favorece la navegación autónoma, la biodetección y la monitorización ambiental en profundidad; su aplicación potencial en AUV refuerza las estrategias de presencia persistente y recopilación de datos en zonas disputadas. Permite un mayor conocimiento de la biota marina, con implicaciones para la definición de áreas de protección ambiental. Su resistencia favorece su integración en plataformas submarinas, ampliando su potencial aplicación en operaciones de vigilancia, monitoreo y recopilación de datos en el ámbito militar.
OPM	Explora las propiedades asociadas a los átomos de metales alcalinos, cuyos espines electrónicos se controlan mediante luz láser polarizada circularmente. El proceso comienza con el bombeo óptico, en el que un haz láser orienta los espines atómicos en relación con un campo magnético externo. En presencia de un campo magnético débil, estos espines precesionan a una frecuencia proporcional a la intensidad del campo. Esta precesión se mide mediante un láser de lectura.	Sensibles a los gradientes magnéticos ambientales; necesidad de compensación magnética activa; menor rendimiento en campos muy intensos.	No requiere criogenia; sensibilidad similar a la de SQUID en ciertos regímenes; portátiles y escalables; bajo consumo energético; excelentes para integrarlos en AUV/ROV.	Amplían la capacidad de monitoreo magnético de gran área, con aplicación directa en la protección de cables submarinos, la prospección mineral y la vigilancia antisubmarina con grandes implicaciones militares. Su elevada madurez tecnológica favorece su empleo operacional, orientado a controlar infraestructuras críticas y recursos minerales en los fondos marinos de aguas jurisdiccionales e internacionales, permitiendo la identificación de exploradores estatales o no estatales no autorizados y resultando útiles en guerra híbrida.

Fuente: elaboración propia.

Todas las tecnologías listadas anteriormente contribuyen, de distintas formas, al avance de la “ocupación cognitiva”, derivada del concepto de “ocupación territorial” propuesto por Martínez Busch en el ámbito del dominio marítimo. Este proceso de expansión del conocimiento sobre los grandes fondos marinos adquiere especial relevancia estratégica, dado que estos espacios siguen caracterizados por altos niveles de incertidumbre científica y por la persistencia de vacíos en sus definiciones jurídicas y marcos normativos de gestión (Sander et al. 2025, 18-22).

En este ámbito, las tecnologías cuánticas podrían desempeñar un papel clave para generar información crítica sobre estos entornos. Un antecedente comparable se observa tras la adopción de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (UNCLOS) en 1982, cuando el descubrimiento de vida en ambientes abisales evidenció las limitaciones del marco jurídico vigente y contribuyó al posterior desarrollo de instrumentos como el Acuerdo sobre la Diversidad Biológica Marina de las Áreas Fuera de la Jurisdicción Nacional (BBNJ).

De los hallazgos obtenidos, a continuación, se destacan los puntos en relación con las tecnologías analizadas. Considerando la guerra ASW, los sensores OPM muestran indicios de evolución hacia capacidades de detección submarina. Actualmente, se emplean sobre todo para confirmar la posición de objetivos submarinos. Sin embargo, su desarrollo en el mediano plazo podría permitir superar algunas de las limitaciones de los sensores acústicos. Bajo estas circunstancias, cobra relevancia el desarrollo de tecnologías de desmagnetización como posible respuesta operativa.

Se observan los primeros experimentos de detección de cables submarinos mediante sensores cuánticos, sobre todo en China. El desarrollo de esta capacidad podría conferir la posibilidad de identificar y potencialmente interferir infraestructuras críticas en escenarios de guerra híbrida⁵ frente a países occidentales.

Por otra parte, los sensores cuánticos tienden a operar de forma complementaria con sensores clásicos, lo cual, de manera preliminar y en el actual nivel de desarrollo tecnológico, parece adecuado. Lanzagorta y Uhlmann (2019) señalan como perspectiva el uso de la computación cuántica para fusionar datos provenientes de sensores clásicos y cuánticos en el dominio submarino. En esta misma línea, la integración de sensores OPM y centros NV en una misma plataforma permitiría combinar la mayor madurez tecnológica y sensibilidad de los primeros con la precisión vectorial de los segundos, una estrategia relevante para emplearla en vehículos autónomos submarinos (AUV), según Kocak et al. (2024).

En este escenario, Doherty (2025) plantea que el futuro del sensorio cuántico se orienta hacia el desarrollo de una *quantum network*, capaz de integrar múltiples sensores y permitir monitorear grandes áreas, incluyendo el entorno submarino. Este tipo de redes se perfila como un elemento clave crítico para las operaciones multidominio, las cuales están transformando la concepción de la guerra contemporánea (Black et al. 2022).

⁵ La guerra híbrida se caracteriza por la combinación simultánea de distintos modos de conflicto, incluyendo capacidades convencionales, tácticas irregulares, terrorismo y actividades criminales, integrados de manera coordinada por un mismo actor (Hoffman 2007, 8-9).

Perspectivas estratégicas del empleo de sensores cuánticos submarinos

Resulta fundamental prospectar el futuro de la detección cuántica submarina si se considera el sesgo de la guerra de los fondos marinos,⁶ con el objetivo de proteger las infraestructuras marítimas, en el contexto de la seguridad marítima, donde cada vez más los océanos estarán ocupados físicamente, es decir, se produce un proceso neomoderno de *territorialización* de los mares, lo que constituye una tendencia de las disputas oceanopolíticas del poder marítimo (Bueger 2024; Germond 2024).

Como se ha comprobado, en la etapa actual de desarrollo, en términos generales, todavía no existe un uso operativo de los sensores cuánticos en el ámbito submarino, con algunas excepciones. Por lo tanto, se concluye que la perspectiva futura más plausible será su uso inicial como herramienta complementaria para la vigilancia y la seguridad, para llenar las lagunas existentes en las actuales tecnologías acústicas y de imagen submarinas. Estas tecnologías, a pesar de ser tecnológicamente maduras, todavía tienen perspectivas de evolución. Se destaca la iniciativa SMART Cables y el desarrollo de sensores acústicos distribuidos, en los que los cables submarinos incorporan sensores que detectan y monitorizan eventos ambientales y objetos submarinos (Ramírez-Torres et al. 2025).

Además, la detección cuántica submarina se presenta como una nueva herramienta de importancia estratégica. Esto si se tiene en cuenta la guerra de los fondos marinos en la disputa oceanopolítica, más concretamente en lo que respecta a la prospección de minerales en las profundidades marinas de las zonas marítimas internacionales, que a menudo son objeto de incorporación a las aguas jurisdiccionales de los Estados, como en el caso brasileño de la Elevación del Río Grande, así como su impacto en la biota submarina, cuyo código de minería se ha debatido en el ámbito de la Autoridad de los Fondos Marinos, con presiones políticas de los grandes actores, como EE. UU., China y Alemania.

Cabe destacar que algunos minerales raros presentan propiedades magnéticas relevantes, como el gadolinio (Gd), el disprosio (Dy) y el terbio (Tb), que se encuentran con frecuencia en nódulos polimetálicos a grandes profundidades marinas. Estos elementos pueden aplicarse de diversas maneras en la industria de sectores estratégicos. En el ámbito nuclear, se utilizan para fabricar barras de control de reactores, así como en sistemas de blindaje y detección de neutrones; en el ámbito médico, se emplean en equipos de resonancia magnética; en el sector energético, forman parte de imanes de alto rendimiento utilizados en turbinas eólicas y vehículos eléctricos; y, en el ámbito de la defensa, están presentes en actuadores, servomotores, giroscopios, sistemas de guía y control, además de materiales piezoeléctricos aplicados en sonares, entre otros usos (Issindou et al. 2017; Teixeira 2020; Baloyi Ngoepe Chauke 2022; Ghorbani 2025).

Según la Agencia Internacional de la Energía (AIE), se estima que la demanda de terbio y disprosio crecerá un 217,5 % y un 200 %, respectivamente, hasta 2040 (IEA 2025a).

⁶ La guerra de los fondos marinos puede entenderse como el conjunto de operaciones destinadas a conocer, vigilar y actuar sobre el lecho marino, con el fin de proteger infraestructuras críticas, garantizar la libertad de acción de las fuerzas armadas y defender intereses estratégicos en un entorno cada vez más disputado (Assemblée Nationale 2023, 2-3).

Llegamos a la conclusión de que la explotación específica de estos minerales magnéticos tiene un doble potencial para influir en el desarrollo de sensores con aplicaciones militares, lo que supone un acontecimiento de gran relevancia, cuyo seguimiento es estratégico desde el punto de vista de la oceanopolítica, ya que las reservas terrestres se encuentran principalmente en China (60 %) (IEA 2025b), lo que podría alterar el panorama de la disputa por la prospección de dichos minerales en zonas marítimas internacionales.

Como se ha visto, los sensores cuánticos magnéticos OPM y SQUID se emplean para la prospección mineral magnética de forma ventajosa en relación con los sensores magnéticos tradicionales, y los gravímetros cuánticos se presentan como una nueva perspectiva para la prospección de otros tipos de minerales críticos, como el níquel, el manganeso, el niobio, el grafito y las tierras raras (no magnéticas), fundamentales para la transición energética. Estos, según la AIE, muestran un crecimiento de la demanda media estimada de alrededor del 409,6 % hasta 2040. Se destaca el manganeso, cuya previsión de crecimiento es del 1350 % en el mismo periodo (AIE 2025a), lo que, aunque exagerado en su evaluación, ya que considera el cumplimiento de los objetivos del Acuerdo de París, se trata de una tendencia internacional en auge. Cabe destacar que una estimación conservadora indica que existen alrededor de 21 100 millones de toneladas secas de nódulos polimetálicos en la Zona Clarion-Clipperton (CCZ), situada en el fondo del océano Pacífico, con aproximadamente 5950 millones de toneladas de manganeso, lo que supera en magnitud a las reservas terrestres conocidas (Hein 2022).

Si se considera la preservación de la biota marina, incluso durante el proceso de minería marina, el uso de biosensores cuánticos marinos empleados en AUV se presenta como una nueva perspectiva, capaz de detectar organismos vivos microscópicos. Se destacan los NV-Centers y Quantum-Dots, entre otras técnicas.

Más aún, en el ámbito de lo que se denomina biotecnología cuántica (Mauranyapin, Terrasson y Bowen 2022) es posible perfeccionar la capacidad de extraer y procesar nuevos elementos y bioactivos moleculares marinos, alterando los procesos químicos genéticos, con el empleo de diversas tecnologías. Entre estas tecnologías sobresalen los sensores cuánticos plasmónicos, que permiten una comprensión precisa de los procesos microscópicos que subyacen a la formación del ADN de nuevas moléculas (Lee et al. 2021, 32840). Así surge lo que hemos bautizado como “biotecnología cuántica marina”, que abre nuevas perspectivas para aplicaciones en las industrias farmacéutica, alimentaria y cosmética. Esto resulta estratégico para el crecimiento de la economía azul, en particular con el aumento de la exploración de los fondos marinos y la tendencia a descubrir nuevas especies, incluso microscópicas, fuentes potenciales de nuevos compuestos bioactivos.

Según Veluchamy et al. (2025), la bioprospección marina constituye un campo en rápida expansión dentro de la biotecnología azul, con miles de metabolitos bioactivos ya identificados y un creciente potencial industrial, farmacéutico y biotecnológico. Algunos autores sostienen que su impacto económico podría rivalizar o incluso superar, en determinados contextos y especialmente en términos de costos y sostenibilidad, al de la minería de los fondos marinos.

Para Peter Paret, las transformaciones en la guerra no responden exclusivamente a innovaciones tecnológicas, sino a cambios más amplios en la interacción entre factores militares, políticos, sociales y económicos, que en conjunto redefinen la naturaleza del conflicto (Paret 1992, 20-21). Así, las transformaciones emergentes derivadas del sensorio cuántico en el ámbito de las ciencias naturales tendrán impacto en el sector de defensa, al transformar tanto el aprovechamiento económico, como las relaciones políticas oceánicas.

Es importante señalar que se está produciendo un aumento de la madurez de la industria de las tecnologías cuánticas, con la existencia de varias empresas que suministran productos comerciales para la investigación aplicada. Este escenario ya ha llamado la atención de varios gobiernos preocupados por la posibilidad de que actores no estatales tengan la capacidad de desarrollar tecnologías cuánticas, y ya se ha iniciado un proceso de control de las exportaciones.

Por último, un reciente estudio de la Academia Quantum del Reino Unido (UK) omite deliberadamente las aplicaciones de los magnetómetros cuánticos por cuestiones de seguridad nacional (Brooksby et al. 2025, 9), lo que configura la cuestión del secreto del tema como una limitación al trabajo.

En cuanto al carácter limitado de este estudio, especialmente en las aplicaciones militares, las inversiones en tecnologías de desmagnetización adquieren un carácter estratégico. De este modo, se busca contrarrestar las ventajas que pueden derivarse del empleo de magnetómetros cuánticos. Asimismo, resulta necesario el seguimiento de las tecnologías de gravímetros y gradiómetros cuánticos, para las cuales no se identifican aún contramedidas claras.

Conclusiones

En este artículo se estudiaron aplicaciones directas del sensorio cuántico submarino y se analizaron sus posibles impactos oceanopolíticos. Se verificó que la producción científica sobre sensorio cuántico submarino refleja el carácter emergente y aún poco consolidado de este campo, en el cual el desarrollo de los sensores OPM constituye la tendencia más prometedora según los resultados del análisis bibliométrico y técnico. Asimismo, la línea de investigación en magnetometría cuántica es impulsada de manera destacada por científicos chinos en el contexto de la exploración mineral submarina, la cual se caracteriza como el evento de mayor motricidad debido a su naturaleza dual, ya que también posee aplicaciones militares, entre otras. Sin embargo, más allá de la caracterización técnica de estas tecnologías, los resultados del estudio permiten afirmar que su relevancia debe interpretarse en el marco de transformaciones más amplias en la relación entre tecnología, poder y gobernanza en el ámbito oceánico.

A partir del enfoque de la oceanopolítica, los resultados permiten interpretar el sensorio cuántico como un instrumento adicional de “ocupación cognitiva” del territorio oceánico. La capacidad de los sensores clásicos para detectar variaciones de distinta precisión y naturaleza es limitada, lo que plantea implicaciones para la soberanía marítima y la gestión de

estos recursos, como las infraestructuras submarinas críticas, sobre todo cables, estructuras y materiales asociados a la explotación de recursos minerales marinos.

Extrapolando el enfoque oceanopolítico, los recursos debidamente gestionados son parte importante del producto interno bruto y del aprovechamiento de la economía azul de los países latinoamericanos. Consecuentemente, las tecnologías que trabajan en monitorear y proteger estos recursos deben ser consideradas como inversiones con contrapartida económica y no simples inversiones de capital. La falta de estas inversiones implica permanecer vulnerable, tanto por la falta de prevención de amenazas como en la gestión de riesgos. En este sentido, la sensorización cuántica tiende a contribuir a implementar nuevas y eficientes formas de protección y resiliencia de estas infraestructuras.

Para corroborar esta perspectiva, se observa la proliferación de centros de datos y el uso intensivo de datos, los cuales son puestos en curaduría, con el fin de viabilizar el monitoreo en tiempo real, potencialmente transformando la soberanía marítima entre países a la vanguardia de estas tecnologías y países vulnerables a ellas. Esto también implicará reconfigurar las capacidades estatales de mando y control y del derecho en el mar, tanto en el ámbito institucional como jurídico.

En la fase actual de madurez tecnológica, no se observa una sustitución inmediata de los sensores clásicos, sino más bien una transición gradual. Históricamente, los procesos de cambio tecnológico se producen mediante la coexistencia de sistemas heredados y nuevas soluciones, con inversiones planificadas que tienen en cuenta la depreciación y la obsolescencia, mientras que las tecnologías emergentes se someten a validación en condiciones operativas. Al final de este proceso, es plausible que los sensores clásicos sigan desempeñando funciones de apoyo o redundancia para contribuir a la solidez y fiabilidad de los sistemas de monitorización.

Por lo tanto, la base industrial de defensa de la región debería poner énfasis en integrar estas tecnologías debido a su capacidad de generar cambios relevantes. Los Estados latinoamericanos también deberían desarrollar estudios prospectivos sobre sus implicaciones estratégicas y marítimas. Los hallazgos aquí presentados constituyen un punto de partida para investigaciones más detalladas sobre su impacto en la regulación internacional de los mares, las dinámicas sociales, la economía azul y la gobernanza oceánica. En la convergencia entre los avances en tecnología cuántica, la creciente demanda de minerales críticos y la intensificación de las disputas por el control de los espacios marítimos, se configura un conjunto de fuerzas impulsoras que refuerzan el carácter estratégico del sensorio cuántico submarino en la geopolítica marítima contemporánea, con implicaciones relevantes tanto en el presente como en el futuro.

Bibliografía

- Acín, Antonio, Immanuel Bloch, Harry Buhrman, Tommaso Calarco, Christopher Eichler, Jens Eisert, Daniel Esteve, Nicolas Gisin, Steffen Glaser, Fedor Jelezko, Stefan Kuhr, Maciej Lewenstein, Max Riedel, Piet Schmidt, Rob Thew, Andreas Wallraff, Ian Walmsley y Frank Wilhelm. 2018. "The quantum technologies roadmap: a European community view". *New J. Phys* 20: 080201 <https://doi.org/10.1088/1367-2630/aad1ea>.
- Assemblée Nationale. 2023. *Flash information mission on the seabed*. París: Commission de la Défense Nationale. <https://bit.ly/4sxuMkf>
- Baloyi, Mphamela Enos, Phuti Ngoepe y Hasani Chauke. 2022. "Effect of gadolinium rare-earth element on Nd₂Fe₁₄B permanent magnet". *MATEC Web of Conferences* 370: 09001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202237009001>
- Barbosa Júnior, Ilques. 2009. "Oceanopolítica: uma pesquisa preliminar". *Revista Marítima Brasileira* 129: 55-68.
- Black, James, Alice Lynch, Kristian Gustafson, David Blagden, Pauline Paillé, Fiona Quimbre. 2022. "Multi-domain integration in defence". Santa Monica, CA: RAND Corporation. <https://bit.ly/4voDFPr>
- Brasil. 2025. "Decreto nº 12.725, de 18 de novembro de 2025. Aprova a Política Nacional de Defesa, a Estratégia Nacional de Defesa e o Livro Branco de Defesa Nacional". <https://bit.ly/3OBMF30>
- Brooksby, Austin, Aaron Smith, Arryonna Hickam, Michael Manda, Andrew Rogers, and Melissa LaDuke. 2025. "A Conceptual Framework for Describing the Future Impacts of Quantum Sensors to National Security". *Academia Quantum* 2. <https://doi.org/10.20935/AcadQuant7590>.
- Bueger, Christian, y Timothy Edmunds. 2024. "Understanding Maritime Security". Nova York: Oxford University Press. <https://doi.org/10.1177/26316846251318472>
- Capri, Alex. 2024. *The New Geopolitics of Undersea Cables*. Hinrich Foundation.
- Corrêa, Fernanda. 2025. "Ecossistema quântico para defesa". Presentado en el XXXI Ciclo de Estudos Estratégicos – Inteligência Artificial e Tecnologias Quânticas: Tendências e Desafios para a Defesa, Escola de Comando e Estado-Maior do Exército, 17 de junio.
- Doherty, Marcus. 2025. "Quantum Technologies: An Introduction and of their Impact on War". *War 4.0: Armed Conflict in an Age of Speed, Uncertainty and Transformation*. <https://doi.org/10.22459/W4.2025>
- Estados Unidos da América. 2025. "National Security Strategy of the United States of America". Washington, DC, noviembre. <https://bit.ly/3N1zNm6>
- Germond, Basil. 2024. "Seapower in the Post-modern World". McGill-Queen's Press-MQUP.
- Ghorbani, Yousef, I. M. S. K. Ilankoon, Nimila Dushyantha, y Glen T. Nwaila. 2025. "Rare earth permanent magnets for the green energy transition: bottlenecks, current developments and cleaner production solutions". *Resources, Conservation and Recycling* 212: 107966. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107966>

- Guff, Thomas J., Nathan A. McMahon, Yuval R. Sanders y Alexei Gilchrist. 2021. “A resource theory of quantum measurements”. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*. <https://doi.org/10.1088/1751-8121/abed67>
- Hambling, David. 2017. “China’s quantum submarine detector could seal South China Sea”. *New Scientist*, 22 de agosto. <https://bit.ly/4rFnU4z>.
- Hein, James R., E. T. Baker, M. Hannington, et al. 2022. “Deep-ocean polymetallic nodules and cobalt-rich ferromanganese crusts: global ocean new frontiers for metals”. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report. https://doi.org/10.1163/9789004507388_013
- Hoffman, Frank G. 2007. “Conflict in the 21st Century: The Rise of Hybrid Wars”. Arlington: Potomac Institute for Policy Studies.
- International Energy Agency (IEA). 2025a. “Critical Minerals Data Explorer”. <https://bit.ly/4r6119l>
- International Energy Agency (IEA). 2025b. “With new export controls on critical minerals, supply concentration risks become reality”. <https://bit.ly/3P9R7pJ>
- Kocak, Donna M., Benjamin Thayer, Haley Stumvoll, Jim Drakes y Chris Hessenius. 2024. “Quantum magnetometry for enhanced sensing in autonomous underwater vehicles”. En *OCEANS2024–Halifax*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/OCEANS55160.2024.10753713>
- Lanzagorta, Marco, y Jeffrey Uhlmann. 2019. “Quantum sensing in maritime operations”. *Marine Technology Society Journal* 53 (5): 75-87. <https://doi.org/10.4031/MTSJ.53.5.14>
- Lee, Changhyoup, Benjamin Lawrie, Raphael Pooser, Kwang-Geol Lee, Carsten Rockstuhl y Mark Tame. 2021. “Quantum plasmonic sensors”. *Chemical Reviews* 121 (8): 4743–4804. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c01028>
- Li, Guozhu, Xuxing Geng, Shangqing Liang, Yuanpeng Chen, Guangming Huang, Gaoxiang Li, Xueting Zhang y Guoqing Yang. 2024. “Attitude-independent route tracking for subsea power cables using a scalar magnetometer under high sea conditions”. *Remote Sensing* 16 (2): 226. <https://doi.org/10.3390/rs16020226>
- Li, Yulong, Tiequan Xu, Yue Wang, Furen Wang y Zizhao Gan. 2023. “Development of an HTS-SQUID-based receiver for long-range magnetic induction communication in extreme environments”. *Sensors* 23: 4434. <https://doi.org/10.3390/s23094434>
- Marcial, Elaine Coutinho, y Raul José dos Santos Grumbach. 2008. “Cenários prospectivos: como construir um futuro melhor”. 5. ed. Rio de Janeiro: FGV Editora.
- Martínez Busch, Jorge. 1993. “Oceanopolítica: una alternativa para el desarrollo”. Santiago de Chile: Editorial Andrés Bello.
- Nathan, Benjamin. 2023. “Quantum sensing for anti-submarine warfare”. En *2023 IEEE Integrated STEM Education Conference (ISEC)*, 256-258. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISEC57711.2023.10402282>.
- Norouzi Yazdi, Zahra, Seyed Mohammad Hosseiny y Jamileh Seyed-Yazdi. 2025. “An array of tunnel magnetoresistance sensors for detecting magnetic anomalies”. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1109/ISEC57711.2023.10402282>

- Paret, Peter, ed. 1992. "Creadores de la estrategia moderna: desde Maquiavelo a la era nuclear". Madrid: Ministerio de Defensa.
- Popper, Rafael. 2008. "Foresight methodology". En *The Handbook of Technology Foresight: Concepts and Practice*, editado por Luke Georghiou et al., 44-88. Cheltenham: Edward Elgar.
- Pogorzelski, Jens, L. Horsthemke, J. Homrighausen, D. Stiegekötter, M. Gregor, y P. Glösekötter. 2024. "Compact and fully integrated LED quantum sensor based on NV centers in diamond". *Sensors* 24 (3): 743. <https://doi.org/10.3390/s24030743>
- Ramirez-Torres, E. Eduardo, Javier Macias-Guarasa, Daniel Pizarro-Perez, Javier Tejedor, Sira Elena Palazuelos-Cagigas Senior Member, IEEE, Pedro J. Vidal-Moreno, Sonia Martin-Lopez, Miguel Gonzalez-Herraez y Roel Vanthillo. "Vessel Detection and Localization Using Distributed Acoustic Sensing in Submarine Optical Fiber Cables". *Journal of Marine Science and Engineering* 12 (10): 1725. <https://doi.org/10.3390/jmse12101725>
- Sander, Sylvia Gertrud, Christian Tamburini, Sabine Gollner, Bleuenn Guilloux, Ellen Pape, Henk-Jan Hoving, Riwan Leroux, Marzia Rovere, Miguel Semedo, Roberto Danovaro y Bhavani Narayanaswamy. 2025. "Deep Sea Research and Management Needs". European Marine Board ISBN: 9789464206357. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14928917>
- Unión Europea. 2016. "Quantum Technology Roadmap – Quantum Information Processing". Bruselas: EU. <https://bit.ly/4rUkYAY>
- University of Birmingham. 2023. "Quantum sensor for gravity gradiometry successfully validated at sea". 18 de septiembre. <https://bit.ly/4r1Rhgj>
- Veluchamy, Chandra, Nagaraj Nallakaruppan, Kanagam Nachiappan, Manoj Sekaran, Riddhi Bharat Vartak, Rutuja Balasaheb Zambare, Sathishkumar Panneerselvam, Rajasekaran Chandrasekaran, Avinash Sharma y Kalaivani Thiagarajan. 2025. "Marine microbial bioprospecting and bioactive bioproducts: seven decades of discovery and contemporary perspectives". *Front. Mar. Sci.* 12:1698327. <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1698327>
- Yu, Ziyun, Yunbin Zhu, Wenzhe Zhang, Ke Jing, Shuo Wang, Chuanxu Chen, Yijin Xie, Xing Rong, y Jiangfeng Du. 2025. "Experimental demonstration of a diamond quantum vector magnetometer for deep-sea applications". *National Science Review* 12 (4): nwae478. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwae478>