
EL CAMBIO CLIMÁTICO Y SU IMPACTO EN LA DETECCIÓN SUBMARINA

♦ R E S U M E N ♦

El cambio climático está cambiando las propiedades físicas del océano, afectando crucialmente la propagación de las ondas de sonido en el agua, afectando sonares y con ello, la capacidad de detección submarina. Diferentes estudios indican que la detección acústica se hará más difícil, con implicaciones significativas para la guerra antisubmarina y las capacidades militares. Por otra parte, desde la mirada económica, el cambio en las temperaturas de las aguas en los océanos está impactando severamente los ecosistemas marinos, alterando la distribución de especies, y la industria pesquera.

Palabras clave: Pesca, guerra, clima, detección.

THE EFFECTS OF CLIMATE CHANGE ON UNDERWATER DETECTION

♦ A B S T R A C T ♦

Climate change is altering the physical properties of the ocean, which in turn has a critical effect on acoustic propagation. These changes directly impact sonar performance and, consequently, underwater detection capabilities. Numerous studies indicate that acoustic detection will become increasingly challenging, carrying significant implications for anti-submarine warfare (ASW) and overall military readiness. Beyond the military sphere, the economic impact is equally severe: warming waters are transforming marine ecosystems, altering the habitats of various species, and threatening the stability of the fishing industry.

Keywords: Fishing, warfare, climate, detection.



LEONARDO QUIJARRO SANTIBÁÑEZ

Contraalmirante (R)

Magister en Ciencias Navales y Marítimas (AGN)

(lquijarro@msn.com)

Viña del Mar, Chile

El cambio climático es una de las mayores amenazas de nuestro tiempo, con consecuencias de gran alcance, que van mucho más allá de los desastres socio-naturales y la inestabilidad económica. A pesar de su clara influencia en la geopolítica y los recursos, el impacto del cambio climático en la seguridad militar y las operaciones navales sigue siendo un área relativamente inexplorada en la academia; sin embargo, la historia muestra que las condiciones ambientales han influido en el resultado de conflictos bélicos, haciendo que esta omisión sea un punto crítico a abordar en el análisis estratégico.

El clima, por ende, las condiciones meteorológicas, han sido siempre un elemento relevante en las operaciones militares, en particular en el dominio marítimo, siendo clave tanto para la planificación como ejecución de operaciones (Hume, 2024). En el ámbito civil, la situación no difiere en lo más mínimo, siendo relevante para el movimiento de grandes cargueros como para las flotas pesqueras.

En el centro del poder naval contemporáneo se encuentran los submarinos, que cumplen un rol dual como disuasores, en algunos casos nucleares y, por otro lado, como amenazas silenciosas para las flotas enemigas y las líneas de comunicaciones marítimas. Su valor estratégico radica en su habilidad inherente para operar de manera indetectable. En este contexto, múltiples naciones, en particular aquellas de primer orden, se sustentan, en gran medida, en sus avanzadas capacidades antisubmarinas; sin embargo, la efectividad de la detección submarina ya sea activa o pasiva, depende crucialmente de la física de la propagación del sonido bajo el agua.

Este medio de propagación acústica no es estático; está directamente influenciado por las propiedades del agua, como la presión, temperatura y salinidad. Estos dos últimos factores, a su vez, están siendo alterados de manera significativa por el cambio climático, no así la presión. A medida que el océano se calienta y las capas de agua dulce de los polos se mezclan, las condiciones que rigen la propagación del sonido se modifican, lo que

“Los efectos del cambio climático no son solo ambientales; son estratégicos, ya que alteran la distribución de poder y redefinen los intereses nacionales.”

Caitlin Talmadge, profesora asociada MIT

potencialmente podría cambiar las reglas del juego de la guerra naval y en actividades comerciales asociadas a la pesca (Rising ocean temperature and climate change, 2021). Actualmente, existe un debate sobre si los avances tecnológicos en la detección conducirán a una “transparencia oceánica” total, haciendo que los submarinos se vuelvan obsoletos (Kallenborn, 2019). Este argumento, sin embargo, a menudo ignora la variable dinámica y fundamental de un medio oceánico que está en constante cambio. Este mismo cambio y asociado a las mismas razones esgrimidas en el ámbito militar es el que puede tener efectos sobre las operaciones de las flotas pesqueras, afectando tanto a los sistemas de rebusca de los tan preciados cardúmenes como también a los peces, que pudieran ver afectados sus ecosistemas y migrar de las zonas donde tradicionalmente se les extrae.

El presente trabajo busca plantear precisamente alguno de esos efectos indirectos que el cambio climático ejerce sobre un componente importante, tanto en los ámbitos económico como militar, como es la capacidad de detección submarina.

¿Por qué prestar atención al cambio climático respecto de la capacidad de detección submarina?

La detección submarina, sea respecto de submarinos o de vida marina, se rige, básicamente, por la ecuación del sonar,

que relaciona el nivel de sonido emitido por el objetivo (Source Level, SL), la pérdida de intensidad del sonido al viajar por el agua (Transmission Loss, TL), el ruido ambiental (Noise Level, NL) y la capacidad del sonar para discernir la señal del ruido (Array Gain, AG y Processing Gain, PG). La detección ocurre cuando la señal del eco del objeto submarino, más las capacidades del sonar, superan la pérdida de transmisión y el ruido ambiental. El cambio climático impacta directamente en el ruido ambiental y en la pérdida de transmisión. Un aumento en el ruido ambiental o una mayor pérdida de transmisión debilitará la relación señal-ruido, dificultando la detección, y viceversa. Pequeñas variaciones en la velocidad del sonido, causadas por cambios en la temperatura y la salinidad, pueden tener efectos profundos en la propagación acústica y, por lo tanto, en la probabilidad y el alcance de detección. Por ejemplo, una disminución de pocos decibeles en la señal puede reducir la probabilidad de detección del 90% al 50% o acortar el rango de detección a la mitad.

Las simulaciones oceanográficas-acústicas realizadas por investigadores, tanto extranjeros como nacionales, han comparado patrones de propagación del sonido submarino entre un período de referencia (1970-1999) y un escenario futuro hipotético (2070-2099) (Gilli, Gilli, Ricchi, Russo, & Carniel, 2024), tanto en estudios desarrollados en el extranjero y, en un periodo menor (1979-2006), por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) (Calvete, 2025), asumiendo un aumento significativo de las emisiones de gases de efecto invernadero evidenciaron interesantes resultados. Estos estudios se enfocaron en diferentes regiones de aguas profundas y cuencas oceánicas, no solo por sus características oceanográficas, sino también por su importancia geopolítica y, por consiguiente, de potencial interés para el empleo de submarinos de diferente tipo, como también por su empleo masivo en la pesca.



**Submarino nuclear clase Virginia, de la Marina de EE.UU.
(Fuente: Wikimedia Commons)**

El cambio climático y su impacto en la detección submarina

L. Quijarro

El problema militar: Impacto en la guerra antisubmarina (ASW)

La ASW depende, fundamentalmente, de la capacidad de detectar submarinos, principalmente a través de la propagación del sonido bajo el agua. Como se indicó en el párrafo precedente, esta propagación, a su vez, está influenciada por variables oceánicas como la temperatura y la salinidad, que están siendo alteradas por el cambio climático. Comprender cómo estas variables cambian es crucial para predecir la efectividad futura de los sistemas de sonar.

Los sistemas de sonar se dividen en dos tipos: activos y pasivos. El sonar activo emite un pulso acústico ("ping") y capta su eco, mientras que el sonar pasivo solo escucha los sonidos provenientes del ambiente o del propio submarino. El sonar pasivo es más adecuado para la detección a larga distancia de submarinos ruidosos debido a su capacidad para capturar sonidos de baja frecuencia que se propagan por cientos o incluso miles de kilómetros. Sin embargo, los submarinos modernos son muy silenciosos, lo que limita el alcance del sonar pasivo. En contraste, el sonar activo puede ser más eficiente con submarinos más silenciosos; sin embargo, su uso alerta al submarino de su presencia, comprometiendo el sigilo (Kissel, 2023).

Resultados de interés militar obtenidos para diferentes áreas geográficas:

Los resultados obtenidos, tanto en mediciones en terreno como aquellas prospectadas en simulaciones, realizadas por equipos científicos mencionados anteriormente, se han basado,

fundamentalmente, en la información preexistente, la que, principalmente, ha sido obtenida del hemisferio norte, e indican que la detección acústica de submarinos será más compleja en la mayoría de las áreas. En lo general, los resultados obtenidos indican que en el Atlántico Norte se experimentarán los cambios más significativos, mientras que para el Pacífico Occidental muestra cambios más moderados. En el Atlántico subtropical y el Pacífico tropical, los cambios son limitados, al igual que en el Pacífico Suroriental.

- **Atlántico Norte (más allá del golfo de Vizcaya):** De los estudios realizados, en esta zona se observó el cambio más significativo en la propagación del sonido submarino. El canal de sonido en la capa superior de la columna de agua (menos de 200 metros de profundidad), que antes facilitaba la propagación de sonido a larga distancia con poca pérdida de transmisión, desaparece en el escenario futuro realizado en base a las simulaciones (2070-2099). Esto haría mucho más difícil, para un sonar pasivo, detectar un submarino a larga distancia en la capa superior del agua. Las zonas de convergencia acústica se expanden en ancho y se vuelven menos intensas, lo que significa que un sonar pasivo necesitaría estar precisamente en la zona de convergencia para captar la señal, y la detección a distancias intermedias (entre 80 y 140 km) es poco probable.

Por otra parte, para el caso de los sonares activos, la capa o zona de sombra (áreas no penetradas por los "pings" acústicos) se agranda significativamente en el escenario futuro. Esto dificultaría la detección submarina que se encuentran por debajo de los 150-200 metros del sonar activo. Un canal de sonido superficial mucho más fuerte en los primeros 150 metros del agua atrapa el sonido, facilitando la detección de submarinos que operan dentro de él, pero dificultando enormemente la detección de aquellos que navegan por debajo, en la zona de sombra.

- **Mar de Groenlandia (Atlántico Norte):** En esta área, los diferentes estudios muestran un aumento moderado en la pérdida de transmisión entre el pasado y el futuro. El conducto superficial, que en el pasado mejoraba la propagación acústica, se debilita en el escenario futuro, lo que dificulta la detección submarina a larga distancia con sistemas pasivos. En el caso de los sistemas activos, respecto de los registros históricos, una mayor cantidad de energía acústica se dirige hacia el fondo del océano y se pierde, el conducto superficial se debilita y se acerca más a la superficie, teniendo como consecuencia que los rangos de detección con propagación directa disminuyen hasta un 50%.
- **Mar de Filipinas (Pacífico Occidental):** En esta área geográfica, tanto para los sistemas pasivos como activos, se pudieron observar cambios menores o apenas discernibles en los patrones de propagación del sonido entre el pasado y el futuro. Las zonas de convergencia se vuelven más uniformes.
- **Mar de Japón (Pacífico Occidental):** En esta zona, se pudo observar un aumento moderado en la pérdida de transmisión acústica. Las zonas de convergencia se hacen más profundas en el escenario futuro, dificultando la detección por sistemas pasivos en la capa superior del océano. Por otra parte, para los sistemas activos, la energía acústica tiende a desviarse hacia el fondo marino, lo que implica mayor absorción y pérdida de transmisión. Las zonas de convergencia se expanden significativamente tanto en profundidad como en anchura. Las diferencias son menos significativas para la propagación directa, pero se observa una mayor disminución en el rango de detección para la propagación indirecta.
- **Atlántico Subtropical (cerca de Tenerife) y Pacífico Tropical (Mar de China Meridional):** Estas áreas no exhiben cambios significativos en la pérdida de transmisión. Sin embargo, en el Mar de China Meridional, las



Las fragatas francesas de tipo F70, incorporan un sonar de profundidad variable (VDS) de tipo DUBV43 o DUBV43C. (Fuente: Wikimedia Commons)

El cambio climático y su impacto en la detección submarina

L. Gujardo

condiciones de temperatura y salinidad del agua ya limitan la propagación del sonido, lo que dificulta intrínsecamente la detección de submarinos.

- **Pacífico Suroriental (costas de Chile):** En esta zona, en el litoral frente a las costas de Chile, se ha registrado una disminución de aproximadamente $0,2^{\circ}$ C/década en el periodo entre 1979 y 2006. Este efecto se pudo constatar que no solo afecta la costa, sino que también una franja que se proyectaría hasta cerca de los 70 km producto del fenómeno de surgencia costera. Es decir, las dificultades para la detección de submarinos serán incrementales en el tiempo.

Todo lo presentado en términos de prospectiva entrega resultados interesantes; sin embargo, se deben tener presentes algunas limitaciones de las simulaciones realizadas por los equipos de investigación dado que éstas asumen que otras variables de la ecuación del

sonar, como el nivel de ruido ambiental, la fuerza de la señal y el umbral de detección, permanecen constantes, aunque en la realidad es probable que estas también cambien. De igual forma, se debe tener presente la diferencia en la disponibilidad entre las diferentes cuencas oceánicas, lo que ha influido también en la consistencia prospectiva de la investigación realizada. Asimismo, se debe considerar que el desarrollo, presente y futuro, en las tecnologías de detección (sensores, conectividad multisensor, big data, aprendizaje automático, Unmanned Underwater Vehicles) también avanzará, lo que podría compensar algunos de estos efectos (Gilli & Gilli, The hunt for Red October in warmer oceans, 2025). La relevancia de la acústica submarina es poco probable que desaparezca en las próximas dos o tres décadas, lo que valida la importancia de estos resultados a medio plazo y la importancia de que sea un factor a considerar en la planificación y entrenamiento.



AGS-61 Cabo de Hornos, posee un sonar de rebusca omnidireccional de largo y corto alcance para biomasa.
(Fuente: Armada de Chile)

El problema económico: Impacto en la pesca

El cambio climático no solo redefine el panorama militar submarino, sino que también ejerce una presión considerable sobre los ecosistemas marinos y la industria pesquera. Los impactos son múltiples y se deben a una variedad de factores físicos y químicos alterados por el clima, como la temperatura, la salinidad, el oxígeno disuelto y el pH del agua. Estos cambios se superponen a otras presiones antropogénicas preexistentes, como la mortalidad por pesca, la pérdida de hábitat y la contaminación, lo que agrava la vulnerabilidad de las poblaciones de peces (Brander, 2010).

Los efectos del cambio climático en las pesquerías y acuicultura se pueden manifestar de dos maneras principales:

1. **Efectos Directos:** Actúan sobre la fisiología, las tasas de desarrollo, la reproducción, el comportamiento y la supervivencia de los organismos individuales. El aumento de las temperaturas oceánicas afecta directamente a la vida marina, ya que muchos sistemas de plantas y animales han evolucionado durante millones de años en ambientes con condiciones térmicas relativamente estables, y ahora experimentan cambios rápidos y desestabilizadores.
2. **Efectos Indirectos:** Operan a través de los procesos del ecosistema, alterando la producción de alimento o la abundancia de competidores, depredadores y patógenos.

Algunas de las consecuencias directas e indirectas observadas y proyectadas incluyen:

- **Aumento de la temperatura oceánica:** El océano ha absorbido aproximadamente el 90% del exceso de calor causado por el cambio climático. Aunque el agua tiene

una alta capacidad calorífica, lo que ha ralentizado el aumento de la temperatura, incluso pequeñas diferencias pueden causar cambios significativos y peligrosos en la salud y estabilidad del océano. El aumento de la temperatura superficial del mar podría llegar hasta los 4°C en los próximos 80 años (IPCC, 2022).

- **Acidificación oceánica:** El océano absorbe entre el 25% y el 30% del dióxido de carbono liberado a la atmósfera. Desde la Revolución Industrial, el pH del océano ha disminuido 0.1 unidades en promedio, lo que representa un aumento del 30% en la acidez. Este cambio, el más rápido en 50 millones de años, es catastrófico para la vida marina.
- **Migración de especies:** Más del 80% de la vida marina en la Tierra está migrando y cambiando sus patrones de reproducción y alimentación debido al calentamiento de las aguas oceánicas. Las especies marinas migran diez veces más rápido que las terrestres, llegando a desplazarse hasta 600 millas de sus ubicaciones anteriores en pocas décadas. Esto altera la distribución de las poblaciones de peces, afectando la disponibilidad de recursos pesqueros en las zonas tradicionales.

La complejidad de distinguir la variabilidad climática natural de los cambios antropogénicos es un desafío. Sin embargo, la tasa de cambio climático actual es más rápida que los cambios naturales anteriores, y la resiliencia de las especies y los sistemas se ve comprometida por presiones concurrentes como la sobrepesca, la pérdida de biodiversidad y la destrucción de hábitats.

Aunque existen algunos efectos positivos menores del calentamiento oceánico, como la facilitación del turismo en ciertas áreas o el transporte marítimo en zonas antes cubiertas de hielo, estos son insignificantes en comparación con los impactos económicos negativos, incluida la interrupción de las pesquerías y los modos de vida tradicionales.

Implicancias estratégicas y militares

El estudio del cambio climático en el contexto de la seguridad y la economía revela una interconexión profunda entre los fenómenos naturales y las capacidades humanas y militares. Los cambios en el océano no son aislados, sino que afectan simultáneamente a la guerra antisubmarina y a las pesquerías, ambas dependientes de la estabilidad y las propiedades del entorno marino.

1. **Detección de submarinos más difícil:** Una consecuencia general es que la detección acústica de submarinos será más difícil que en la actualidad en la mayoría de las áreas, especialmente en el Atlántico Norte, donde se observan los cambios más significativos en la propagación del sonido, y moderadamente más difícil en el Pacífico Occidental y Suroriental. Esto sugiere que la noción de una "transparencia oceánica" inminente es más compleja y no es un resultado inevitable en todas las condiciones.
2. **Degradación de capacidades ASW:** Las capacidades antisubmarinas de las marinas del mundo podrían verse degradadas por el cambio climático, ya que se predice un aumento de la pérdida de transmisión acústica en áreas clave.
3. **Aumento de sensores:** El incremento en la pérdida de transmisión implicará una reducción en el rango de propagación del sonido, requiriendo un mayor número de sensores submarinos (fijos, remolcados o autónomos) para lograr una cobertura persistente de un área determinada. Esto hará que la vigilancia de grandes extensiones de mar sea más exigente, difícil y costosa, no descartándose la incorporación de UUV como parte del dispositivo de unidades de superficie.
4. **Importancia del arma submarina:** El cambio climático podría hacer

que los submarinos, tripulados y no tripulados, sean activos navales aún más importantes en el futuro, especialmente a medida que las flotas de superficie se vuelven más vulnerables a las crecientes capacidades de vigilancia y ataque.

Implicancias económicas y sociales:

1. **Impacto negativo en la producción pesquera:** El calentamiento de los océanos tiene consecuencias profundamente negativas en la productividad de las pesquerías. La alteración de los ecosistemas marinos y la disminución de organismos base de la cadena trófica impactan directamente en la disponibilidad de peces. Como consecuencia de lo antes indicado, el incremento en las fricciones entre flotas pesqueras de diferentes países puede derivar en incidentes y conflictos por estos recursos. Objeto abordar este problema, la Conferencia Intergubernamental sobre la Diversidad Biológica Marina de las Zonas Situadas Fuera de la Jurisdicción Nacional, celebrada bajo el auspicio de Naciones Unidas en junio de 2023, logró el Acuerdo relativo a la Diversidad Biológica Marina de las Zonas Situadas Fuera de la Jurisdicción Nacional (Acuerdo BBNJ), buscando establecer la relevancia de la conservación de los océanos y la importancia de la biodiversidad marina, siendo de alguna forma, una actualización a la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar. (Acuerdo BBNJ, 2023)
2. **Migración de especies:** La migración acelerada de especies marinas para buscar aguas más adecuadas altera los caladeros tradicionales y exige una adaptación urgente en las estrategias de gestión pesquera. Esto puede provocar conflictos por los recursos y requiere sistemas de monitoreo y gestión flexibles y receptivos.

Conclusiones

- El cambio climático tiene, potencialmente, un impacto global entre naciones, sea desde la perspectiva geopolítica como económica, implicando que su análisis debe ser incorporado en los estudios y análisis estratégicos de los países.
- Uno de los efectos concretos de este cambio climático se puede observar en las variaciones de las temperaturas de los océanos y, como consecuencia, en las capacidades de detección submarina, sea de medios navales como de vida marina. Lo anterior lleva a validar no solo la vigencia del arma submarina, sino el rol que puede cumplir en los potenciales escenarios a ocurrir en la fricción entre países. Por otra parte, esos efectos en la detección submarina afectarán a las flotas pesqueras en su búsqueda de recursos, los que, a su vez, son más escurridizos.
- La mayor exigencia para mantener un adecuado control del mundo submarino obligará a las marinas a incrementar los medios dedicados a estas labores, incluyendo vehículos no tripulados que puedan operar en apoyo de estas tareas.
- El cambio climático impone desafíos complejos y multifacéticos que redefinen la interacción entre la naturaleza, la seguridad y la economía. La capacidad de detectar submarinos y especies marinas se volverá, en general, más compleja y limitada, lo que puede alterar el equilibrio de poder global e imponer desafíos de seguridad. Simultáneamente, la salud de los océanos se deteriora, poniendo en riesgo la biodiversidad y la sostenibilidad de las pesquerías. La integración de la ciencia climática en la planificación militar y la gestión económica de los países, se hace imperativa, para una adaptación efectiva y alcanzar una estabilidad futura.



BIBLIOGRAFÍA

1. Acuerdo BBNJ. (2023, junio 19). Naciones Unidas. <https://www.un.org/bbnjagreement/es>
2. Brander, K. (2010). *Impacts of climate change in fisheries*. Marine Systems.
3. Calvete, C. (2025). Informe técnico: Enfriamiento en la zona costera de Chile. Valparaíso.
4. Gilli, A., & Gilli, M. (2025). The hunt for Red October in warmer oceans. *Outlook*.
5. Gilli, A., Gilli, M., Ricchi, A., Russo, A., & Carniel, S. (2024). Climate change and military power: Hunting for submarines in the warming ocean. *Texas National Security Review*.
6. Hume, R. (2024, septiembre 30). The 4 ways climate change affects the Navy. *The Liquid Grid*. <https://theliquidgrid.com/climate-change-affects-the-navy/>
7. IPCC. (2022). *The ocean and cryosphere in a changing climate*. Cambridge University Press.
8. Kallenborn, Z. (2019, octubre). If the oceans become transparent. *Proceedings. U.S. Naval Institute*.
9. Kissel, R. (2023, diciembre 20). New study suggests climate change will make submarine warfare more complex. *The Strategist*. <https://www.aspistrategist.org.au/new-study-suggests-climate-change-will-make-submarine-warfare-more-complex/>
10. Rising ocean temperature and climate change. (2021). *Climate Check*. <https://climatecheck.com/risks/heat/rising-ocean-temperatures-and-climate-change>