

Turiel Martínez, A.; Bergas Ques, J.; Ruiz Sebastián, A.; González Gambau, V.; Olmedo Casal, E. ¿Se está deteniendo la AMOC? Lo que la teledetección puede decir al respecto

¿Se está deteniendo la AMOC? Lo que la teledetección puede decir al respecto

Turiel Martínez, Antonio¹ **Bergas Ques, Joan**¹ **Ruiz Sebastián, Arnau**¹ **González Gambau, Verónica**¹ **Olmedo Casal, Estrella**¹

¹ Instituto de Ciencias del Mar, CSIC, España & Barcelona Expert Center

ORCID: Turiel Martínez 0000-0001-6103-224X Bergas Ques 0009-0006-3909-2266 Ruiz Sebastián 0009-0002-7596-9185
González Gambau 0000-0002-6380-3754 Olmedo Casal 0000-0002-3178-1554

Correspondencia: turiel@icm.csic.es jbergas@icm.csic.es arnauruiz@icm.csic.es vgonzalez@icm.csic.es
olmedo@icm.csic.es

RESUMEN

En los últimos años se ha reabierto el debate sobre la posible ralentización (o incluso detención) del Brazo Atlántico de la Corriente Meridional de Lazo (AMOC), una importante corriente oceánica que garantiza un clima estable en Europa. Las medidas in situ de la intensidad de la AMOC son escasas y requieren largos períodos de integración para aportar una información fiable, pero en los últimos años se han acumulado indicios de cambios en la AMOC, y dada la gravedad de lo que supondría pasar este punto de no retorno (tipping point), se hace necesario intentar conseguir tanta información relevante como sea posible. En este trabajo, mostraremos que los datos de teledetección actuales tienen el potencial de mostrar y monitorizar los cambios de la AMOC, incluyendo estimar su intensidad. No solo eso: la observación satelital nos proporciona una descripción oceanográficamente precisa de su variabilidad y evidencia un cuadro muchísimo más rico y complejo que la simplificación conceptual actual. La teledetección servirá por tanto no tan solo para mejorar la monitorización de este proceso y los cambios en la formación de aguas profundas en general, sino para afinar la descripción física de los procesos y mejorar la predicción climática.

Palabras clave: AMOC, punto de no retorno, Oceanografía Analítica por Satellite, formación de aguas profundas, interacción atmósfera-océano.

Fecha de recepción: 16 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 16 febrero 2026

¿Se está deteniendo la AMOC? Lo que la teledetección puede decir al respecto

Turiel Martínez, Antonio ⁽¹⁾, Bergas Ques, Joan ⁽¹⁾, Ruiz Sebastián, Arnau ⁽¹⁾, González Gambau, Verónica ⁽¹⁾, Olmedo Casal, Estrella ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Instituto de Ciencias del Mar, CSIC, España & Barcelona Expert Center.

 0000-0001-6103-224X, turiel@icm.csic.es ;  0009-0006-3909-2266, jbergas@icm.csic.es.
 0009-0002-7596-9185, arnauruiz@icm.csic.es ;  0000-0002-6380-3754, vgonzalez@icm.csic.es.
 0000-0002-3178-1554, olmedo@icm.csic.es.

Resumen: En los últimos años se ha reabierto el debate sobre la posible ralentización (o incluso detención) del Brazo Atlántico de la Corriente Meridional de Lazo (AMOC), una importante corriente oceánica que garantiza un clima estable en Europa. Las medidas *in situ* de la intensidad de la AMOC son escasas y requieren largos períodos de integración para aportar una información fiable, pero en los últimos años se han acumulado indicios de cambios en la AMOC, y dada la gravedad de lo que supondría pasar este punto de no retorno (*tipping point*), se hace necesario intentar conseguir tanta información relevante como sea posible. En este trabajo, mostraremos que los datos de teledetección actuales tienen el potencial de mostrar y monitorizar los cambios de la AMOC, incluyendo estimar su intensidad. No solo eso: la observación satelital nos proporciona una descripción oceanográficamente precisa de su variabilidad y evidencia un cuadro muchísimo más rico y complejo que la simplificación conceptual actual. La teledetección servirá por tanto no tan solo para mejorar la monitorización de este proceso y los cambios en la formación de aguas profundas en general, sino para afinar la descripción física de los procesos y mejorar la predicción climática.

Palabras clave: AMOC, punto de no retorno, Oceanografía Analítica por Satellite, formación de aguas profundas, interacción atmósfera-océano.

Is AMOC slowing down? What remote sensing can say about that.

Abstract: *During the last years, the old debate about the possible Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) slowdown (or even shutdown) has been reopened. The AMOC is an important oceanic current that grants a stable climate for Europe. In situ measurements of AMOC strength are scarce and require long integration periods, in order to provide a reliable information, but during the last years the evidences of changes in AMOC are mounting, and given the seriousness of passing this tipping point, to gather as much relevant information as possible has become mandatory. In this talk, we will show that current remote sensing data have the potential to evidence and to monitor the changes in AMOC, including the estimation of its strength. Not only that: satellite data provides us with a more oceanographically precise description of its variability and evidences a richer and more complex framework for AMOC beyond the current conceptual simplification. Remote sensing will therefore be useful not only to improve the monitoring of AMOC and the changes in deep water formation in general, but also to improve the physical description of the processes and so enhancing climate forecasting.*

Keywords: *AMOC, tipping point, Satellite-based Analytic Oceanography, deep water formation, sea-atmosphere interaction*

1. INTRODUCCIÓN

La Corriente Meridional del Lazo (Meridional Overturning Current, MOC), también conocida como Corriente Termohalina o Gran Cinta Transportadora, es una corriente oceánica que en superficie fluye de manera predominantemente zonal (eje oeste-este) siguiendo dos de los grandes sistemas de corrientes (la Corriente del Golfo y la Corriente Circumpolar Antártica) y que en

profundidad circula de manera predominantemente meridional (eje norte-sur). En superficie, esta corriente sigue los grandes patrones de circulación inducidos por el viento y el ajuste geostrófico, mientras que en profundidad su movimiento viene determinado por las variaciones de densidad asociadas a los cambios de temperatura y salinidad del paquete de agua. Esta corriente es fundamental para la redistribución de energía entre los polos y el ecuador, y para la ventilación

de las aguas profundas. El brazo atlántico de la MOC, conocido como AMOC (ver conceptualización en la Figura 1) genera un flujo de energía hacia Europa de hasta 1 PW que mantiene Europa Central en un estado más cálido de lo que correspondería por su latitud.

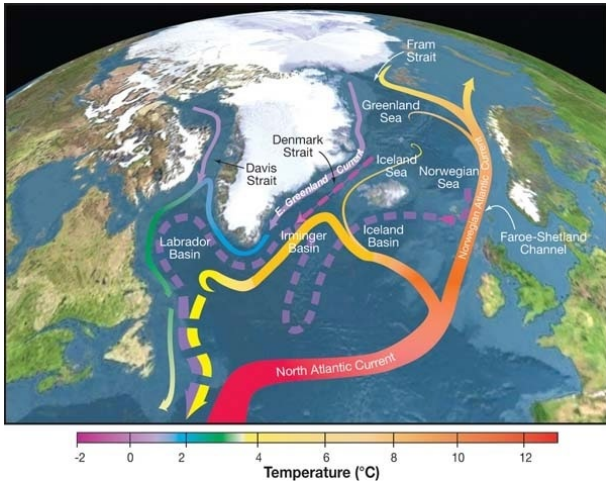


Figura 1. Esquema conceptual de la AMOC. La corriente fluye desde América del Norte hacia Europa como un brazo de la Corriente del Golfo, del que luego se separa para fluir hacia la Europa del Norte, librándole calor y humedad en el proceso, y luego retrocede hasta que el agua se vuelve tan densa que se hunde hasta una profundidad de 2000 metros en el interior del océano, por donde circula de norte a sur.

Los procesos asociados al Cambio Climático, en particular, la mayor presencia de agua dulce en superficie, los cambios de los patrones de viento que provocan enfriamiento y evaporación del agua y por tanto su densificación, así como la modificación de la circulación de mesoescala, pueden estar contribuyendo a ralentizar la AMOC, y eventualmente podrían causar su detención. La detención de la AMOC se considera un punto de no retorno planetario catastrófico, que haría caer las temperaturas de la Europa del Norte hasta 30°C y desplazaría la ICTZ hacia el sur y con ella la precipitación en la Amazonia, la selva centroafricana y el monzón asiático: más de 3000 millones de personas se verían gravemente afectadas (van Westen, 2024).

2. TELEDETECCIÓN DE LOS INDICIOS DE CAMBIO EN LA AMOC

Desde 2014, se ha registrado la presencia de una anomalía persistente de temperatura del agua del mar al sur de Groenlandia: mientras que en la mayoría del planeta la temperatura superficial del agua del mar sube con mayor o menos intensidad, en esta amplia zona disminuye, lo cual es un indicio de detención de la AMOC que además no pueden explicar los modelos del CMIP6 utilizados por el IPCC (Rahmstorf, 2024). Como mostramos en (Turiel, 2024), ese cambio está asociado a cambios en los patrones globales de circulación.

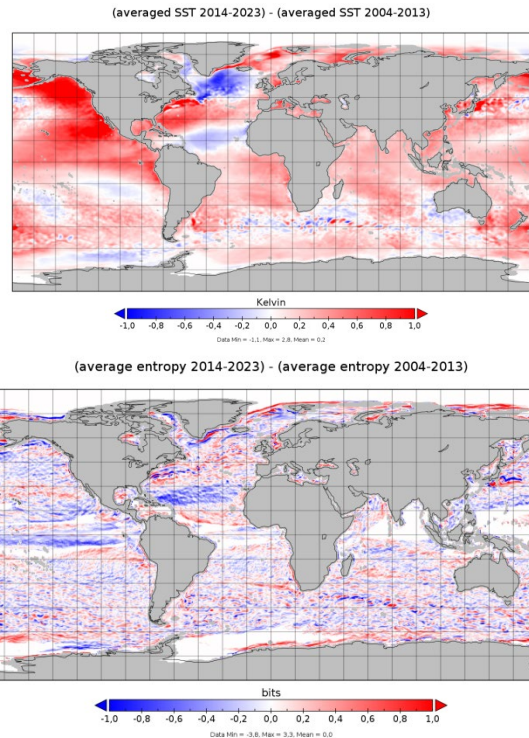


Figura 2. Arriba: Diferencia interdecadal de la temperatura promedio de la superficie del mar. La mayor anomalía negativa se registra al sur de Groenlandia. Abajo: Diferencia interdecadal del contenido de información, reflejando un cambio de los patrones globales de circulación. Adaptado de Turiel, 2026 – en preparación.

3. TELEDETECCIÓN DE LA INTERACCIÓN ATMÓSFERA-OCÉANO

Siguiendo la formulación presentada por (Groeskamp, 2019), se puede deducir el ritmo de formación de aguas profundas en la superficie del mar a partir de la derivada material de la densidad del agua del mar, de la siguiente forma:

$$M = h D\rho = h (\partial_t \rho + \vec{v} \cdot \nabla \rho) \quad (1)$$

donde M es el flujo de masa, h es la profundidad de la capa de mezcla, ρ es la densidad del agua del mar y \vec{v} es la velocidad del agua.

Aplicando la ecuación termodinámica del agua del mar (TEOS10) (Pawlowicz, 2012) se puede calcular la densidad ρ a partir de la temperatura y la salinidad superficiales, que son variables obtenibles por teledetección. Para calcular la derivada material, se precisa una secuencia temporal y el valor del campo de velocidad, el cual se puede estimar con radares altímetros. Para acabar el cálculo, se precisa tener la profundidad de la capa de mezcla, la cual no se puede obtener por medios de teledetección y debe incorporarse a partir de estimaciones de datos *in situ*.

En (Piracha, 2023) se utilizó este formalismo, llamado formalismo cinemático, para estimar los flujos de masa asociados a la formación de aguas profundas desde la

superficie del mar. Para la temperatura de la superficie del mar se utilizaron datos de OSTIA de nivel 4 diarios, reducidos a una resolución de 0.25°; para la salinidad, el producto global de nivel 4 generado por el BEC, 0.25° y un día; para las corrientes superficiales, el producto OSCAR de la NASA también a 0.25° de promedios diarios, y para la profundidad de la capa de mezcla el producto de JAMSTEC de 1° derivado de datos in situ (derivadores-perfiladores Argo). Este primer trabajo demostró la factibilidad de estimar flujos a través de la superficie oceánica incorporando solamente datos de observación del mar, sin incluir datos atmosféricos, y mayoritariamente proveniente de fuentes de teledetección.

4. ¿SE PUEDE ESTIMAR LA INTENSIDAD DE LA AMOC A PARTIR DE MEDIDAS DE LA SUPERFICIE DEL OCÉANO?

En (Desbruyères, 2019), usando datos de simulaciones numéricas del océano, se mostró que se puede relacionar la circulación forzada en superficie (SFOC), que se estima con derivadas de variables de la superficie, con la intensidad de la AMOC.

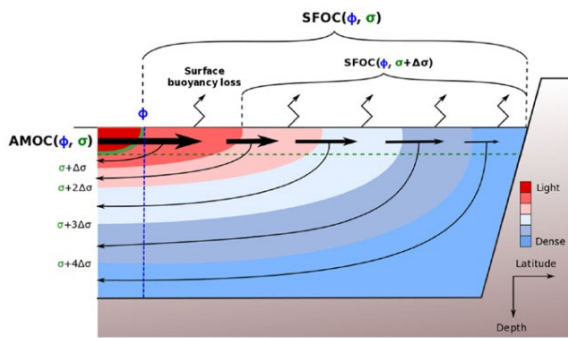


Figura 3. Relación entre la circulación forzada en superficie (SFOC) y la intensidad de la AMOC. Extraído de la figura 1 en (Desbruyères, 2019).

La clave es determinar las isopícnas superficiales asociadas a la densidad del agua transportada con la AMOC. La intensidad de la AMOC se puede calcular por tanto como:

$$\Phi(\rho_0) = \iint_{C_{\rho_0}} h(\vec{x}) D\rho(\vec{x}) d\vec{x} \quad (2)$$

donde ρ_0 es la densidad característica del agua asociada a la AMOC y C_{ρ_0} es el contorno en la superficie del mar formado por los puntos con esa densidad (isopícnas).

Como se muestra en (Desbruyères, 2019), al comparar los datos la SFOC con los de la AMOC en algún transecto habitual como el formado por la red de boyas OSNAC, se ve un desfase temporal en años correspondiente al tiempo que tarda la señal de superficie en propagarse hasta la latitud de la red (en el caso de OSNAC, 5 años). Esto evidencia otro de los intereses de estimar la fuerza de la AMOC a partir de los datos de teledetección, y es que podemos observar estos cambios mucho antes de que las actuales redes

instrumentales puedan reportarlo, lo cual da más opciones a una respuesta inmediata.

5. LIMITACIONES ACTUALES Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

La limitación más importante es la de la calidad de los datos de teledetección y la imposibilidad de obtener una fuente de datos de teledetección y de alta resolución espacio-temporal de la profundidad de la capa de mezcla. Respecto a lo primero, nuestros trabajos preliminares (ver contribución por Bergas *et al.* en este mismo congreso) muestran que el nivel de ruido en SSS, SST, corrientes y MLD limitan al resolución espacial efectiva de los flujos verticales, incluyendo el flujo de masa asociado a la AMOC, a unos 100 kilómetros de resolución espacial y unos 9 días en resolución temporal, y un error relativo del 20%. Aunque ésta sea una resolución bastante grosera, es más que suficiente para estudios de carácter climático como es la caracterización de los cambios de la AMOC; es más, son valores mucho más resueltos que las actuales estimaciones basadas en datos atmosféricos e integración con modelos numéricos del océano.

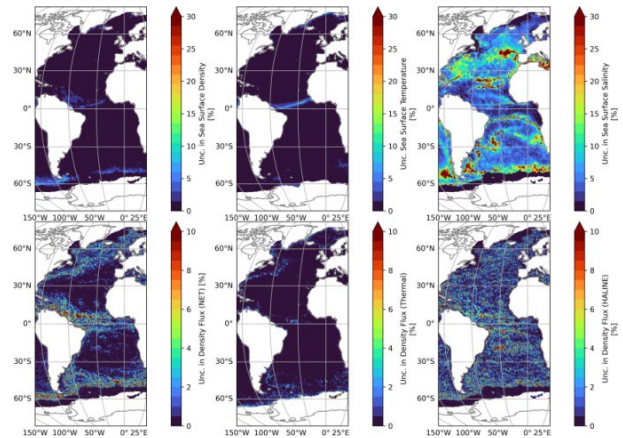


Figura 4. Incertidumbre relativa en las componentes del flujo de masa estimada con datos de teledetección adaptado de (Piracha, 2023, 2024). Izquierda: total; centro: componente térmico; derecha: componente halina.

Sin embargo, de caras al futuro sería ideal poder mejorar la resolución para poder caracterizar los procesos de formación de aguas profundas. Resulta que la formación de aguas profundas es fuertemente intermitente y muy dispersa en el espacio, lejos de la simplificación conceptual que se usa siempre (ver Figura 1). La variable donde se tiene que incidir más, por sus limitaciones de adquisición actuales, es la salinidad. En el corto plazo tenemos la misión CIMR, que incorporará un radiómetro en banda L que debería servir para mejorar las actuales estimaciones de la salinidad con la europea SMOS, la americana SMAP y la china COSM. A medio plazo, la misión candidata a Earth Explorer 12 CryoRad incorporará, si es seleccionada, medidas continuas en la banda de 0.5 a 2 GHz, que corresponde con el rango de frecuencias en el que la señal radiométrica tiene la máxima sensibilidad a la salinidad. Y a largo plazo, la apuesta principal es por SAILIN, un interferómetro de

apertura sintética en banda L formado por tres antenas hexagonales que se desplegarían en tres plataformas satelitales que volarían en formación, y que nos permitirían alcanzar una resolución real de 15 km con una precisión mucho mejor que la actual.

La estimación por medios de teledetección de la profundidad de la capa de mezcla requiere de unos desarrollos conceptuales aún inexistentes. Posibles estrategias instrumentales/metodológicas incluyen el uso de LIDAR, el procesamiento conjunto de información multiespectral para estimar la profundidad óptica y los cambios de turbidez asociados al proceso de mezcla vertical, y otras aproximaciones más sofisticadas y especulativas, como la caracterización de la profundidad de la capa de mezcla por la curvatura local en el rango de la submesoescala de las isolíneas de ciertas variables oceánicas. El objetivo sería obtener un producto repetitivo, sinóptico, con una resolución de 0.25° y una precisión relativa de al menos el 20%.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo hemos revisado tanto las capacidades actuales de teledetección relacionadas con el monitoreo de la AMOC como los desarrollos metodológicos necesarios para esta monitorización, en los cuales nuestro grupo, el Barcelona Expert Center, ha tenido una contribución muy destacada. Hemos visto que las variables físicas de la superficie del océano obtenidas por medios de teledetección ofrecen información suficiente para reconstruir los procesos de formación de aguas profundas y a través de ellos saber qué está pasando con la AMOC y otros procesos claves del océano. La principal limitación a día de hoy es el nivel de error de los datos de partida, pero incluso contando con eso la ganancia respecto al conocimiento actual, tanto en resolución espacio-temporal como en la precisión de la descripción de los procesos es muy grande.

Este trabajo ha evidenciado el gran potencial de una nueva disciplina, la Oceanografía Analítica por Satélite, en la cual se aplican directamente las ecuaciones de la física oceánica a los datos de teledetección para obtener una mejor estimación de variables clave como los flujos de calor y agua dulce, o los ritmos de transformación de aguas. Este enfoque permite ir más allá del paradigma de la utilización de modelos numéricos y sacar mucho más provecho de un tesoro acumulado durante décadas de datos de teledetección, cuyo uso ha sido más cualitativo que cuantitativo.

Gracias a las iniciativas de la Agencia Espacial Europea para la mejora de la explotación de los datos satelitales, a través de los contratos ARCTIC FLOW y CCI Ocean Surface Heat Flux, se está abriendo una puerta a la mejora de la comprensión de los procesos tan intensos que está experimentando el océano en los últimos años, y que no se limitan a la AMOC, sino a todo tipos de procesos, desde los cambios del estado del Océano Austral (Silvano, 2025) como la detención repentina del afloramiento del Golfo de Panamá o la sobre-ocurrencia de El Niño.

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto EO4TIP de la Agencia Estatal de Investigación (PID2023-149659OB-C21) y por los contratos ARCTIC FLOW y CCI OSHF de la Agencia Espacial Europea. Los autores forman parte del Instituto de Ciencias del Mar, acreditado como Centro de Excelencia "Severo Ochoa" CEX-2024-001494-S por la Agencia Estatal de Investigación.

8. REFERENCIAS

- Desbruyères, D. G., Mercier, H., Maze, G., and Danialt, N. (2019). Surface predictor of overturning circulation and heat content change in the subpolar North Atlantic, *Oc. Sci.*, 15, 809–817, <https://doi.org/10.5194/os-15-809-2019>.
- Groeskamp, J., Griffies, S. M., Iudicone, D., Marsh, R., Nurser, A.G., Zika, J.D. (2019). The Water Mass Transformation Framework for Ocean Physics and Biogeochemistry. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 11:21.1–21.35.
- Pawlowicz, R., et al. (2012). The TEOS-10 Gibbs Function and Its Thermodynamic Properties. *J. Phys. Ocean.*
- Piracha A, Olmedo E, Turiel A, Portabella M and González-Haro C (2023). Using satellite observations of ocean variables to improve estimates of water mass (trans)formation. *Front. Mar. Sci.* 10:1020153.
- Piracha, A. M. (2024). Updated framework for inferring interior ocean circulation from high resolution marine satellite observations. Doctoral Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Rahmstorf, S. (2024). Is the Atlantic overturning circulation approaching a tipping point? *Oceanography*, <https://doi.org/10.5670/oceanog.2024.501>
- Silvano, A., Narayanan A., Catany, R., Olmedo, E., González-Gambau, V., Turiel, A., Sabia, R., Mazloff, M.R., Spira, T., Haumannh, F.A. , and Naveira Garabato, A.C. (2025). Rising surface salinity and declining sea ice: Ocean state revealed by satellites. *Proc. Nat. Ac. Sci.* 122, e2500440122.
- Turiel A., Isern-Fontanet J. y González-Haro C. Estructura e información en teledetección oceánica: de la fusión de datos a la identificación de puntos de inflexión climáticos. Teledetección y Cambio Global: Retos y Oportunidades para un Crecimiento Azul. 2024, Cádiz. ISBN: 978-84-9828-941-1
- van Westen, R.M., Kliphuis, M., & Dijkstra, H.A. (2024). Physics-based early warning signal shows that AMOC is on tipping course. *Sci. Adv.* 10, eadk1189