

Bergas Ques, J.; Ruiz Sebastián, A.; González Gambau, V.; Turiel Martínez, A.; Arias Ballesteros, M.; Sagués Carracedo, A.; Olmedo Casal, E. Nuevas estimaciones satelitales de flujos oceánicos superficiales

Nuevas estimaciones satelitales de flujos oceánicos superficiales

Bergas Ques, Joan¹ **Ruiz Sebastián, Arnau**¹ **González Gambau, Verónica**¹ **Turiel Martínez, Antonio**¹ **Arias Ballesteros, Manuel**² **Sagués Carracedo, Ana**² **Olmedo Casal, Estrella**¹

¹ Barcelona Expert Center (BEC) & Instituto de Ciencias del Mar (ICM), CSIC

² Zenithal Blue Technologies (ZBT)

ORCID: Bergas Ques 0009-0006-3909-2266 Ruiz Sebastián 0009-0002-7596-9185 González Gambau 0000-0002-6380-3754 Turiel Martínez 0000-0001-6103-224X Arias Ballesteros 0000-0002-1951-1105 Sagués Carracedo 0000-0002-3498-2167 Olmedo Casal 0000-0002-3178-1554

Correspondencia: jbergas@icm.csic.es arnauruiz@icm.csic.es vgonzalez@icm.csic.es turiel@icm.csic.es m.arias@zenithalblue.com a.sagues@zenithalblue.com olmedo@icm.csic.es

RESUMEN

Este estudio presenta una aproximación cinemática para la estimación de flujos superficiales del océano (salinidad, densidad y calor) utilizando principalmente datos de teledetección, proponiéndola como alternativa a los modelos y estimaciones tradicionales basados en aproximaciones termodinámicas de interacción atmósfera-océano. Metodológicamente, la aproximación cinemática calcula la derivada material de las variables observadas integradas en la capa de mezcla. Esto permite capturar simultáneamente las interacciones entre la capa superficial del océano y la atmósfera y el impacto de la dinámica de la capa de mezcla. La comparación con modelos (FESOM2 y ERA5) muestra una sólida concordancia en patrones de gran escala. Sin embargo, a escalas temporales diarias aparecen diferencias significativas. La parte espacialmente incoherente de estas diferencias está asociada a los errores en las medidas satelitales. Lo que es más interesante, otra parte de estas diferencias está asociada a fenómenos geofísicos de alta frecuencia, como el forzamiento del viento, señal que capturan las medidas satelitales pero que no se refleja de manera precisa en las salidas de los modelos.

Palabras clave: *Oceanografía Analítica por Satélite, derivada material, interacción atmósfera-océano*


Fecha de recepción: 17 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 17 febrero 2026


Nuevas estimaciones satelitales de flujos oceánicos superficiales

Bergas Ques, Joan ⁽¹⁾, Ruiz Sebastián, Arnau ⁽¹⁾, González Gambau, Verónica ⁽¹⁾, Turiel Martínez, Antonio ⁽¹⁾, Arias Ballesteros, Manuel ⁽²⁾, Sagués Carracedo, Ana ⁽⁶⁾, Olmedo Casal, Estrella ⁽¹⁾

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

 0009-0006-3909-2266, jbergas@icm.csic.es ;  0009-0002-7596-9185, arnauruiz@icm.csic.es

 0000-0002-6380-3754, vgonzalez@icm.csic.es ;  0000-0001-6103-224X, turriel@icm.csic.es

 0000-0002-3178-1554, olmedo@icm.csic.es.

⁽²⁾ Zenithal Blue Technologies (ZBT).

 0000-0002-1951-1105, m.arias@zenithalblue.com ;  0000-0002-3498-2167, a.sagues@zenithalblue.com

Resumen: Este estudio presenta una aproximación cinemática para la estimación de flujos superficiales del océano (salinidad, densidad y calor) utilizando principalmente datos de teledetección, proponiéndola como alternativa a los modelos y estimaciones tradicionales basados en aproximaciones termodinámicas de interacción atmósfera-océano. Metodológicamente, la aproximación cinemática calcula la derivada material de las variables observadas integradas en la capa de mezcla. Esto permite capturar simultáneamente las interacciones entre la capa superficial del océano y la atmósfera y el impacto de la dinámica de la capa de mezcla. La comparación con modelos (FESOM2 y ERA5) muestra una sólida concordancia en patrones de gran escala. Sin embargo, a escalas temporales diarias aparecen diferencias significativas. La parte espacialmente incoherente de estas diferencias está asociada a los errores en las medidas satelitales. Lo que es más interesante, otra parte de estas diferencias está asociada a fenómenos geofísicos de alta frecuencia, como el forzamiento del viento, señal que capturan las medidas satelitales pero que no se refleja de manera precisa en las salidas de los modelos.

Palabras clave: Oceanografía Analítica por Satélite, derivada material, interacción atmósfera-océano.

Novel satellite-based estimates of ocean fluxes

Abstract: *This study presents a kinematic approach for estimating ocean surface fluxes (salinity, density, and heat) using primarily remote-sensing data, proposed as an alternative to traditional model-based and thermodynamic approaches to air-sea interaction. Methodologically, the kinematic approach computes the material derivative of the observed variables integrated over the mixed layer. This formulation enables the simultaneous capture of interactions between the ocean surface layer and the atmosphere, as well as the impact of mixed-layer dynamics. Comparison with model outputs (FESOM2 and ERA5) shows strong agreement in large-scale patterns. However, significant differences emerge in daily timescales. The spatially incoherent component of these differences is associated with errors in satellite measurements. More interestingly, another component is linked to high-frequency geophysical processes, such as wind forcing, which are captured by satellite observations but are not accurately represented in model outputs.*

Keywords: *Satellite-based Analytic Oceanography, material derivative, sea-atmosphere interaction*

1. INTRODUCCIÓN

Los mapas de variables oceánicas (p. ej. salinidad, temperatura, corrientes) obtenidos mediante teledetección representan el estado del océano en un tiempo dado, lo que permite estudiar características geofísicas como gradientes, frentes, máximos, mínimos y anomalías de la distribución resultante.

Por otra parte, los flujos de dichas variables (que pueden también ser derivados a partir de los datos de

teledetección) pueden mostrar una información adicional relacionada con la dinámica del sistema. Por ejemplo, los flujos de salinidad ofrecen información sobre los procesos de formación y fusión del hielo marino, o la evaporación y precipitación en la superficie oceánica; mientras que los flujos de densidad dan información sobre los movimientos verticales del océano y la circulación a gran escala.

Históricamente los flujos oceánicos se han calculado a partir de las ecuaciones primitivas de los procesos conocidos de interacción atmósfera-océano utilizando una aproximación termodinámica, y con datos atmosféricos provenientes de reanálisis meteorológicos (precipitación y evaporación, flujos de calor radiativos y turbulentos, etc.). En este estudio, por el contrario, se han calculado los flujos oceánicos mediante una aproximación cinemática basada en la estimación directa de la derivada material de las variables a partir de datos de teledetección. Esto permite evidenciar simultáneamente todas las interacciones atmósfera-océano (no solo las conocidas) y las interacciones de la capa superficial del océano con capas más profundas. En este estudio se mostrará cómo se calculan los flujos de densidad, de salinidad y de calor superficial del océano con la aproximación cinemática y se compararán los resultados con los obtenidos mediante la aproximación termodinámica a partir de las salidas de los modelos.

2. ESTIMACIÓN DE FLUJOS OCEÁNICOS

2.1. Estimación de flujos de salinidad

A partir de principios de conservación se puede llegar a la ecuación:

$$h \frac{Ds}{Dt} = s(E - P - R - I) + h\nabla(K\nabla s) - (s_0 - s_{-h}) \left(\frac{Dh}{Dt} + w_{-h} \right) \quad (1)$$

donde s es la salinidad superficial del océano (obtenida con datos de teledetección), h es la profundidad de la capa de mezcla (Mixed Layer Depth, MLD), E es el ritmo de evaporación, P es el ritmo de precipitación, R es la escorrentía fluvial, I es el ritmo de derretimiento del hielo, K es la difusividad de la salinidad y w_{-h} es la velocidad vertical del agua en la base de la capa de mezcla.

La aproximación cinemática se basa en el cálculo de la parte izquierda de la ecuación 1: la derivada material de la salinidad superficial multiplicada por la MLD (se considera una capa de mezcla homogénea).

Dado que actualmente no hay medios de teledetección para estimar la MLD, ésta deberá calcularse con datos *in-situ* a través del análisis de perfiles verticales.

Por otro lado, la aproximación termodinámica calcula los flujos de salinidad a partir del primer término de la parte derecha de la ecuación, sin considerar los consiguientes términos de difusividad y arrastre (*entrainment*), y cualquier otro proceso físico relevante (por ejemplo, la dinámica en la interacción del hielo marino o el efecto del oleaje).

2.2. Estimación de flujos de densidad

La ecuación que rige los flujos de densidad es:

$$h \frac{D\rho}{Dt} = -\alpha \frac{Q_{net}}{C_p} + \beta \rho_s \varepsilon + h\nabla(K\nabla \rho) - (\rho_0 - \rho_{-h}) \left(\frac{Dh}{Dt} + w_{-h} \right) \quad (2)$$

donde ρ es la densidad del agua, obtenida a partir de la salinidad y la temperatura mediante la aplicación de la ecuación termodinámica del agua del mar, TEOS10 (Feistel, 2008), α es el coeficiente de expansión térmica, Q_{net} es la suma de flujos de calor atmósfera-océano, C_p es la capacidad calorífica del agua, β es el coeficiente de contracción salina y ε es el balance de agua dulce (E-P-R-I).

De nuevo, la aproximación cinemática calcula los flujos a partir de la parte izquierda de la ecuación 2 y la aproximación termodinámica calcula los dos primeros términos del lado derecho.

2.3. Estimación de flujos de calor

La ecuación que rige los flujos de calor es:

$$h \frac{Dq}{Dt} = Q_{net} + h\nabla(K\nabla q) - (q_0 - q_{-h}) \left(\frac{Dh}{Dt} + w_{-h} \right) \quad (3)$$

donde q es la densidad de calor del agua oceánica, producto de la densidad, capacidad calorífica y temperatura.

De forma análoga a los casos anteriores, la aproximación cinemática utiliza la parte izquierda de la ecuación 3 y la aproximación termodinámica el primer término del lado derecho, que incluye los flujos de calor de longitud de onda corta, onda larga, y la parametrización efectiva de los flujos turbulentos de calor latente y sensible.

2.4. Aproximación numérica

El cálculo de la derivada material se realiza mediante la advección temporal de la variable de estudio debida a las corrientes oceánicas utilizando un método de integración numérica (p. ej. método Euler, Runge Kutta, etc.).

Con esto, la derivada material se calcula con la siguiente ecuación:

$$\frac{Dy}{Dt} = \frac{Y_{teledetec} - Y_{advec}}{Dt} \quad (4)$$

Donde $Y_{teledetec}$ es la variable de estudio medida con teledetección en un tiempo (t), Y_{advec} es la variable de estudio medida en otro tiempo anterior ($t - Dt$) y luego advectada numéricamente por las corrientes hasta el tiempo de t , donde Dt es el intervalo temporal.

Este método precisa de una secuencia temporal de salinidad y temperatura, así como el campo de velocidades, variables que nos proporcionan los satélites.

Dado que los flujos resultantes presentan cierto nivel de ruido, en los resultados finales se ha aplicado un filtro gaussiano paso bajo para reducir el ruido espacialmente incoherente, obteniendo una resolución espacial efectiva de 100 km.

3. DATOS

Los flujos con la aproximación cinemática se han calculado usando los siguientes grupos de datos: para la temperatura de la superficie del mar se utilizaron datos

de OSTIA de nivel 4 diarios (<https://doi.org/10.5067/GHOST-4FK02>, (Donlon *et al.*, 2012), reducidos a una resolución de 25 km; para la salinidad, el producto global de nivel 4 generado por el BEC a 25 km y un día (<https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/16251>, A. García-Espriu, 2026); para las corrientes superficiales, el producto AVISO de CNES también a 25km de promedios diarios (https://doi.org/10.24400/527896/a01_2020.001, (Veillard *et al.*, 2024)), y para la profundidad de la capa de mezcla el producto de CORA de 0,5° (Szekely *et al.*, 2025).

Los flujos con la aproximación termodinámica se han calculado a partir de datos del modelo FESOM2 (<https://fesom2.readthedocs.io/en/latest/>).

4. COMPARATIVA CON MODELOS

Debido a limitaciones de espacio, únicamente se muestran aquí los flujos de densidad, aunque durante la conferencia se presentarán resultados más detallados. Las Figuras 1 y 2 muestran la concordancia de los patrones a gran escala entre ambas aproximaciones tras realizar promedios mensuales y aplicar el filtrado paso bajo.

Se pueden observar diferencias, especialmente notables en los flujos con resolución diaria. Estas diferencias son debidas al diferente método de cálculo, pero también al hecho de que la aproximación cinemática puede mostrar los efectos de las capas profundas y no solo las interacciones océano-atmósfera. Además, estas interacciones cobran mayor importancia cuando la MLD disminuye, ya que el término de arrastre (*entrainment*) aumenta.

Además, los flujos obtenidos con la aproximación cinemática presentan mayor variabilidad espacial que los datos de modelo debido a la influencia de viento, tal como se observa en la comparación interanual de la figura 2.

Cabe mencionar que los resultados de la aproximación cinemática dependen en gran medida de la definición de MLD (aquí definida como la profundidad en la que la densidad potencial aumenta 0.03 Kg/m³ respecto a la densidad potencial a los 10 m, que es un umbral un tanto arbitrario; y también se podría definir con un umbral de temperatura en lugar de densidad) y de los datos de salinidad y temperatura seleccionados de las capas profundas, además de los errores existentes todavía en los datos de teledetección.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo ha demostrado la viabilidad de estimar flujos a través de la superficie oceánica empleando exclusivamente datos de observación, mayoritariamente procedentes de teledetección marina, y prescindiendo de datos atmosféricos.

Los resultados obtenidos confirman que las variables físicas superficiales derivadas de satélite proporcionan información suficiente para reconstruir procesos oceánicos clave. Si bien el error instrumental en los datos de partida constituye la principal limitación actual, la mejora que esta metodología aporta al conocimiento existente es sustancial, tanto en resolución espacio-temporal como en la precisión de la descripción de los procesos físicos.

Asimismo, este estudio evidencia el gran potencial de la Oceanografía Analítica por Satélite. Esta disciplina emergente aplica directamente las ecuaciones de la física oceánica a los datos de teledetección para estimar variables críticas, como los flujos de calor y agua dulce, o las tasas de transformación de masas de agua. Este enfoque permite trascender el paradigma basado en la modelización numérica, habilitando una explotación cuantitativa del registro histórico de datos satelitales acumulado, cuyo uso previo había sido eminentemente cualitativo.

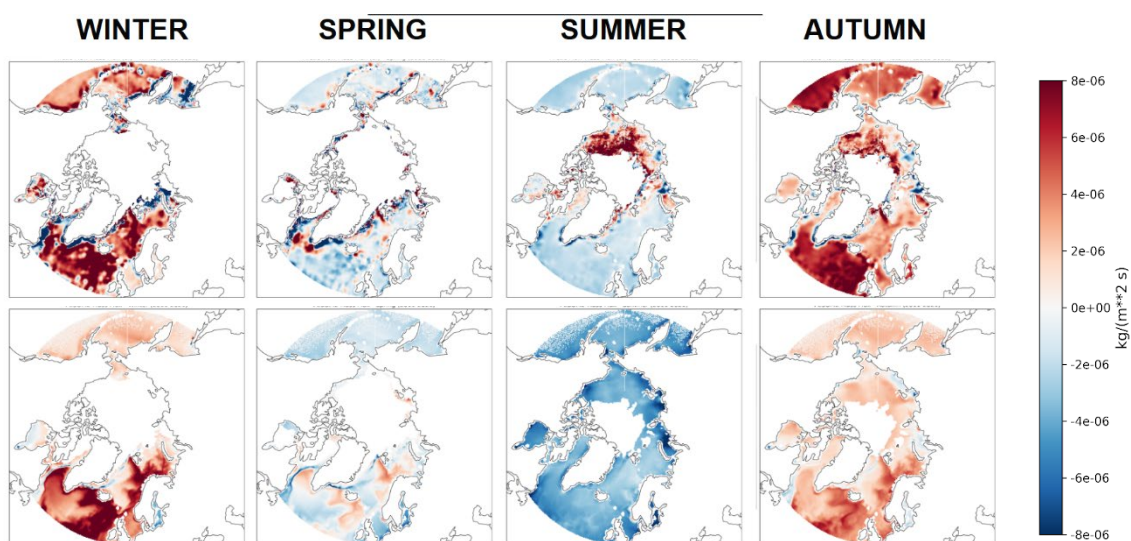


Figura 1. Flujos de densidad promediados por estaciones calculados a partir de la aproximación cinemática y usando el método Euler para la integración numérica (arriba); y flujos de densidad a partir de la aproximación termodinámica del modelo FESOM2 (abajo). Los flujos tienen unidades de kg/(m²s).

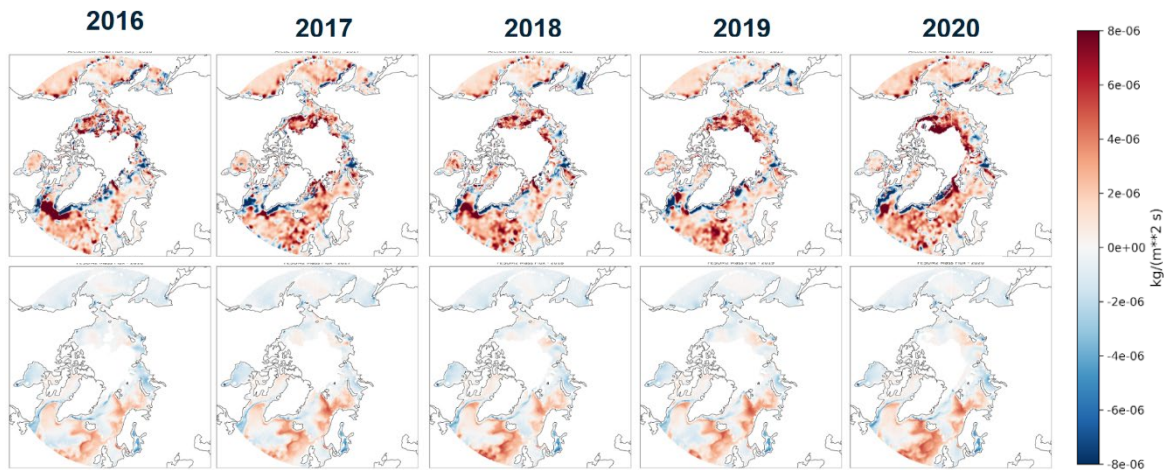


Figura 2. Flujos de densidad promediados en los años comprendidos entre 2016 y 2020 calculados a partir de la aproximación cinemática y usando el método Euler para la integración numérica (arriba); y flujos de densidad a partir de la aproximación termodinámica del modelo FESOM2 (abajo). Los flujos tienen unidades de $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$.

6. 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.

REFERENCIAS

- Donlon, C. J., Martin, M., Stark, J., Roberts-Jones, J., Fiedler, E., & Wimmer, W. (2012). The operational sea surface temperature and sea ice analysis (OSTIA) system. *Remote Sensing of Environment*, *116*, 140–158.
- Feistel, R. (2008). A Gibbs function for seawater thermodynamics for 6 to 80°C and salinity up to 120 g kg^{-1} . *Deep-Sea Research Part I*, *55*, 1639–1671.
<https://doi.org/10.1016/j.dsr.2008.07.004>
- Garcia-Espriu, A., *et al.* (2026). ESA Arctic+ salinity product v4: Enhanced retrievals near the ice edge. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *19*, 5357–5371.
<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2026.3653416>
- Szekely, T., Gourrion, J., Pouliquen, S., & Reverdin, G. (2025). CORA, Coriolis Ocean Dataset for Reanalysis. SEANOE.
<https://doi.org/10.17882/46219>
- Veillard, P., Prandi, P., Pujol, M. I., Daguzé, J. A., Piras, F., Dibarboure, G., & Faugère, Y. (2024). Arctic and Southern Ocean polar sea level maps and along-tracks from multi-mission satellite altimetry from 2011 to 2021. *Frontiers in Marine Science*, *11*, 1419132.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1419132>