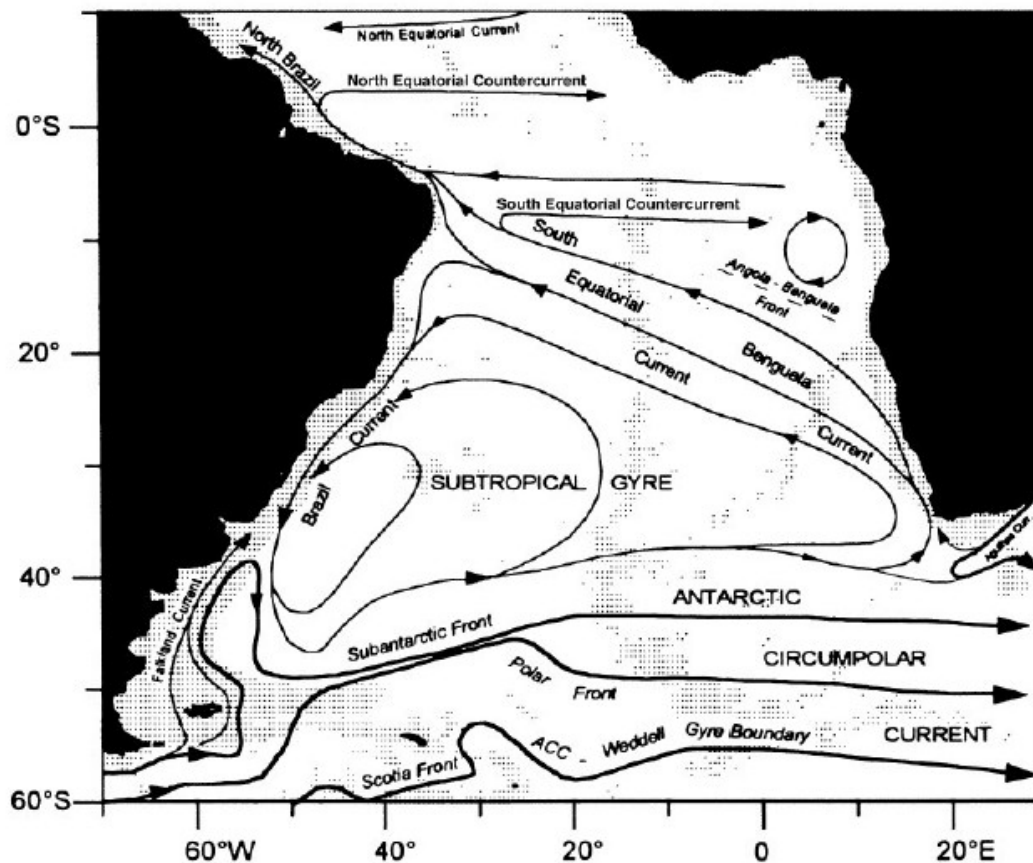


## Circulación oceánica regional

### 1 Atlántico Sur Occidental

La circulación en el Océano Atlántico Sudoccidental (ASO) en capas superficiales es principalmente forzada por los vientos asociados al anticiclón semi-permanente del Atlántico Sur, mientras que en profundidad está gobernada por las masas de agua asociadas a la circulación termohalina.

En el Atlántico Sur la circulación en superficie es dominada por el giro subtropical del sur, el cual está delimitado al norte por la Corriente Sud Ecuatorial, al oeste por la Corriente de Brasil, la Corriente del Atlántico Sur fluyendo hacia el este conforma el límite sur y la Corriente de Benguela marca el límite este cerrando el giro (Figura 1). Además, en el margen oeste de la cuenca oceánica se destaca la corriente de Malvinas.



**Figura 1.** Esquema de la circulación superficial en el océano Atlántico Sur. Tomado de Stramma & England 1999.

## Corriente Brasil (CB)

Se forma a partir de la bifurcación de la corriente Ecuatorial Sur que circula en sentido SE-NW, cuyo transporte es de 16 Sv. Sobre el margen oeste a los 10°S, esta corriente se bifurca hacia el norte dando lugar a la corriente del norte de Brasil, y hacia el sur formando la corriente Brasil que se extiende en dirección sur a lo largo del quiebre de plataforma (isóbata de 200m) alcanzando aproximadamente unos 1500 km de extensión. En su inicio la CB tiene un transporte débil de 4 Sv, que luego se va intensificando debido a procesos de recirculación que ocurren en torno a los 33°S aumentando el transporte a 39 Sv. En la zona de confluencia con la corriente Malvinas se ha estimado que puede alcanzar valores de 40 Sv. La CB se caracteriza por ser una corriente cálida y salina producto de una intensa radiación solar y exceso de evaporación. Es considerada una corriente somera alcanzando hasta los 400-600 m de profundidad. Transporta dos masas de agua: a) Aguas Tropicales (*Tropical Water, TW*) entre superficie y los 200 m, que se caracterizan por tener temperatura mayor a 20 °C y salinidad mayor a 36. La porción más superficial presenta una fina capa de agua dulce producto de la mezcla de aguas de plataforma de baja salinidad y desembocaduras de ríos. b) Aguas Centrales del Atlántico Sur o Aguas subtropicales (*South Atlantic Central Water SACW*) las cuales se encuentra por debajo de las aguas tropicales entre los 200 y 600 m y se caracteriza por tener temperatura entre 6 - 20 °C y salinidad mayor a 34.6 y menor a 36.

## Corriente Malvinas (CM)

Se origina a partir de una rama norte de la corriente Circumpolar Antártica y se caracteriza por transportar aguas frías y relativamente diluidas. Fluye hacia el norte desde superficie hasta el fondo siguiendo el borde y quiebre de la plataforma Argentina, alcanzando una extensión latitudinal de 1800 km aproximadamente. Si bien fluye principalmente por el borde del talud, también realiza intrusiones sobre plataforma, favoreciendo el aumento de la producción primaria. Transporta 60 Sv en los primeros 2000 m, y 75 Sv en total. Tiene una velocidad media de 0.4 m/s alcanzando valores extremos de 1.5 m/s. La CM transporta Aguas Subantárticas (*Subantartic Waters*) que se caracterizan por temperaturas mayores a 2 °C y menores a 8°C, y además tienen la particularidad de ser aguas ricas en oxígeno y nutrientes. La zona donde se encuentra esta corriente es altamente productiva debido a que allí ocurre un proceso de surgencia asociado

al quiebre de la plataforma cuyo mecanismo difiere al mecanismo clásico por viento (ver sección 2).

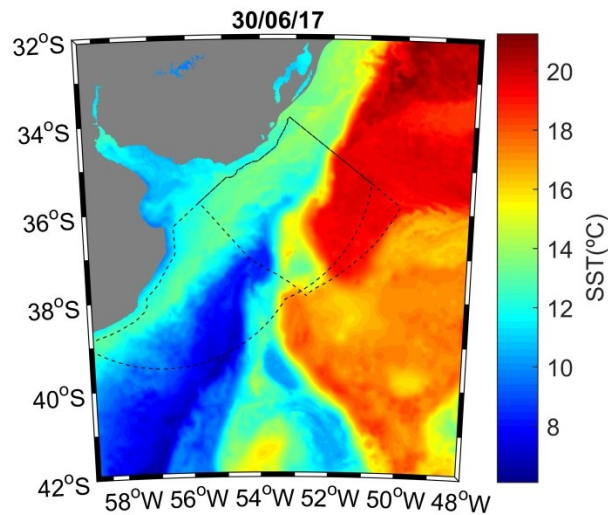
Es importante recordar que las corrientes no son estacionarias ni constantes en el tiempo. Las corrientes más importantes siempre existen, pero la intensidad y dirección de las mismas cambia constantemente en escala de días, semanas, años. También pueden desarrollar anillos que se separan de las corrientes principales dando lugar a los *eddies* o remolinos.

### Confluencia Brasil-Malvinas

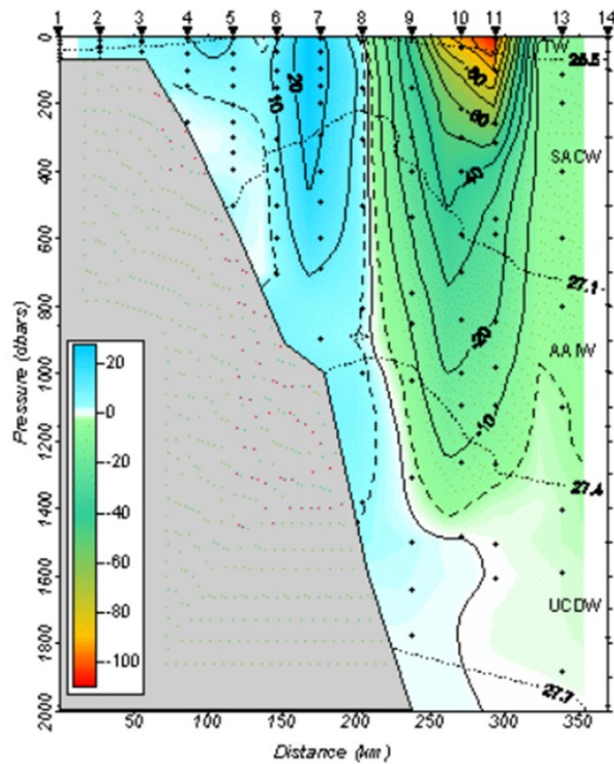
En el ASO la característica oceanográfica que más destaca es la confluencia de las corrientes Brasil y Malvinas (Figura 2). Esta es una zona de convergencia de masas de aguas de diferentes características que ocurre aproximadamente a los  $\sim 38^{\circ}\text{S}$  constituyendo una de las regiones más energéticas del océano global. La convergencia de las corrientes genera inestabilidades oceánicas que forman remolinos (*eddies*), que dan gran variabilidad espacial y temporal a la región. Estos *eddies* son desprendimientos de la corriente original resultando en lentes de agua con características térmicas y halinas diferentes a las aguas circundantes. Los *eddies* de núcleo cálido pueden tener una diferencia de temperatura de hasta  $10^{\circ}\text{C}$  con las aguas circundantes y durar dos meses. La confluencia se separa de la plataforma entre los  $33^{\circ}\text{S}$  y  $38^{\circ}\text{S}$ , formando un intenso frente. Ésta presenta patrones de variabilidad en todas las escalas, siendo la principal el ciclo anual. La confluencia varía estacionalmente en respuesta al movimiento N-S del anticiclón semipermanente del Atlántico sur. En invierno el punto de separación de plataforma de la corriente Brasil está más al N porque se tiene una mayor intrusión de la corriente Malvinas sobre plataforma; en cambio en verano ocurre más al S. En escalas interanuales, los eventos el Niño Oscilación Sur (ENOS) pueden influenciar la posición de la confluencia. Después que se separa de plataforma, la extensión más al S de la corriente Brasil varía entre  $38^{\circ}\text{S}$  y  $46^{\circ}\text{S}$  y en escala de tiempo de 2 meses vinculado a la formación de *eddies*.

En la figura 3 se muestra la velocidad geostrofica de las corrientes en profundidad en la confluencia ( $\sim 38^{\circ}\text{S}$ ). Allí se puede ver la corriente Malvinas (azul) con su flujo hacia el norte que corre sobre el talud y con pequeñas intrusiones sobre plataforma. Asimismo se distingue que tiene intensidades similares a lo largo de toda la columna de agua. Lejos de la plataforma, al este de la corriente Malvinas, está la corriente Brasil que presenta mayores velocidades en superficie y su intensidad disminuye marcadamente con la profundidad.

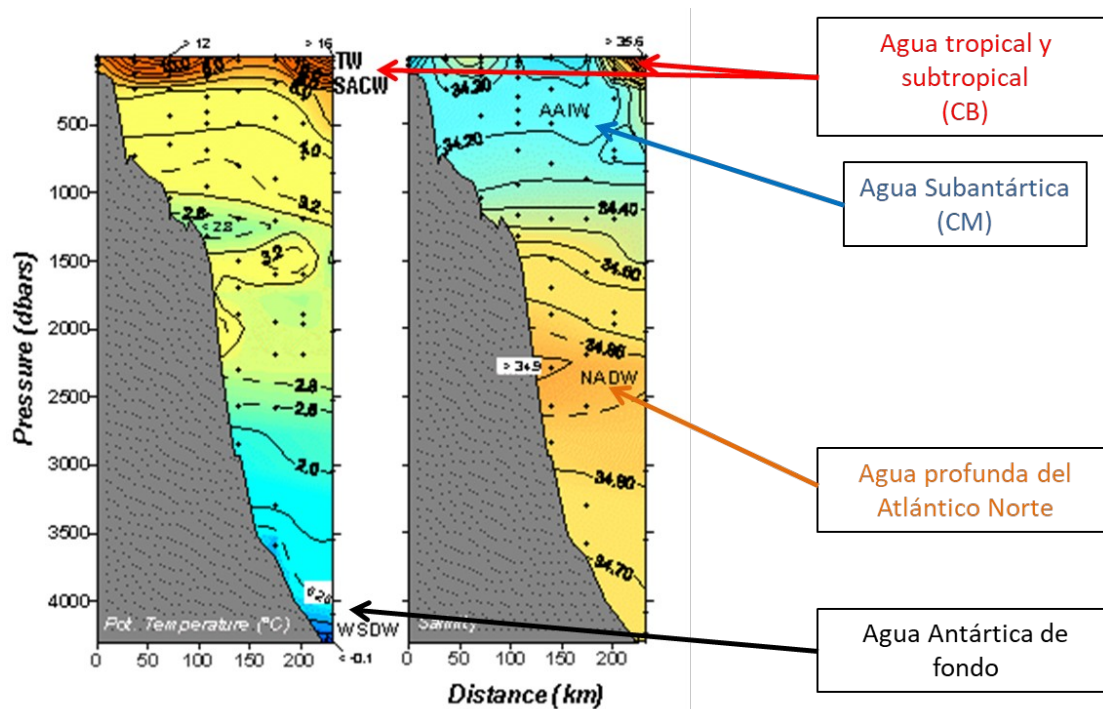
Un corte vertical en la zona de la confluencia muestra una compleja estructura de masas de agua, caracterizada en los primeros 1000 m por la penetración hacia el polo de las aguas subtropicales asociadas a la Corriente de Brasil y la penetración ecuatorial de las aguas subantárticas asociadas a la Corriente de Malvinas (Figura 4).



**Figura 2.** Temperatura superficial del mar (°C) en confluencia Brasil-Malvinas. Datos satelitales GHRSSST-1km. Las líneas negras sobre plataforma indican la zona económica exclusiva de Uruguay, y la zona común de pesca argentino-uruguayo.



**Figura 3.** Velocidad geostrófica a través de la confluencia Brasil-Malvinas ( $\sim 38^\circ\text{S}$ ). Valores positivos (azul) indican flujo hacia el N, valores negativos (verdes-rojos) indican flujo hacia el S, los intervalos de contorno son cada  $10 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  excepto en la zonas punteada que corresponde a  $-3$  y  $3 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Las líneas de puntos más pequeños corresponden a las isopicnas de 25, 27.1, 27.4, y 27.7  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  que marcan la transición entre masas de agua: TW, SACW, AAIW y UCDW. Tomado de Piola et al. (sitio web).



**Figura 4.** Tropical Water (TW), South Atlantic Central Water (SACW), Antarctic Intermediate Water (AAIW), North Atlantic Deep Water (NADW), Weddell Sea Deep Water (WSDW). Tomado y modificado de Piola et al. (sitio web).

Los sitios en el océano donde convergen masas de agua con distintas características determinan zonas altamente productivas llamadas frentes. Los frentes son regiones en el océano donde las propiedades hidrográficas como la temperatura y la salinidad cambian marcadamente en una distancia relativamente corta determinando fuertes gradientes horizontales. Cuan corta sea la distancia depende del proceso que lo genere. En general podemos hablar de escalas de 100 km en océano abierto, y en el orden de metros en estuario.

## 2 Circulación en la plataforma continental del ASO

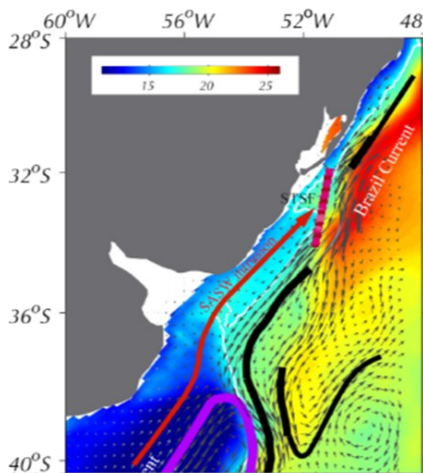
La plataforma del ASO se extiende desde Cabo Frío, Brasil (23°S) al Banco Burdwood (55°S). Es relativamente fina en su límite norte (70km cerca de Cabo Frío) y se ensancha progresivamente hacia el sur, llegando a un máximo de 860km en 51°S (Argentina).

La circulación de la plataforma consiste en un flujo hacia el ecuador de aguas frías provenientes del sur y un flujo hacia el polo de aguas cálidas provenientes del norte. Las masas de agua en plataforma se originan por dilución de las aguas oceánicas adyacentes. Según su temperatura y salinidad pueden definirse dos masas de agua en la plataforma del ASO, el Agua Subantártica de Plataforma (ASP) y el

Agua Subtropical de Plataforma (ASTP). El ASAP se origina por dilución de Agua Subantártica en el Pacífico Sur debido a exceso de precipitación y escorrentía continental, e ingresa al ASO a través del estrecho de Magallanes. Por su parte el ASTP se origina por modificación del agua subtropical (AST) diluida por escorrentía de la costa Brasileira.

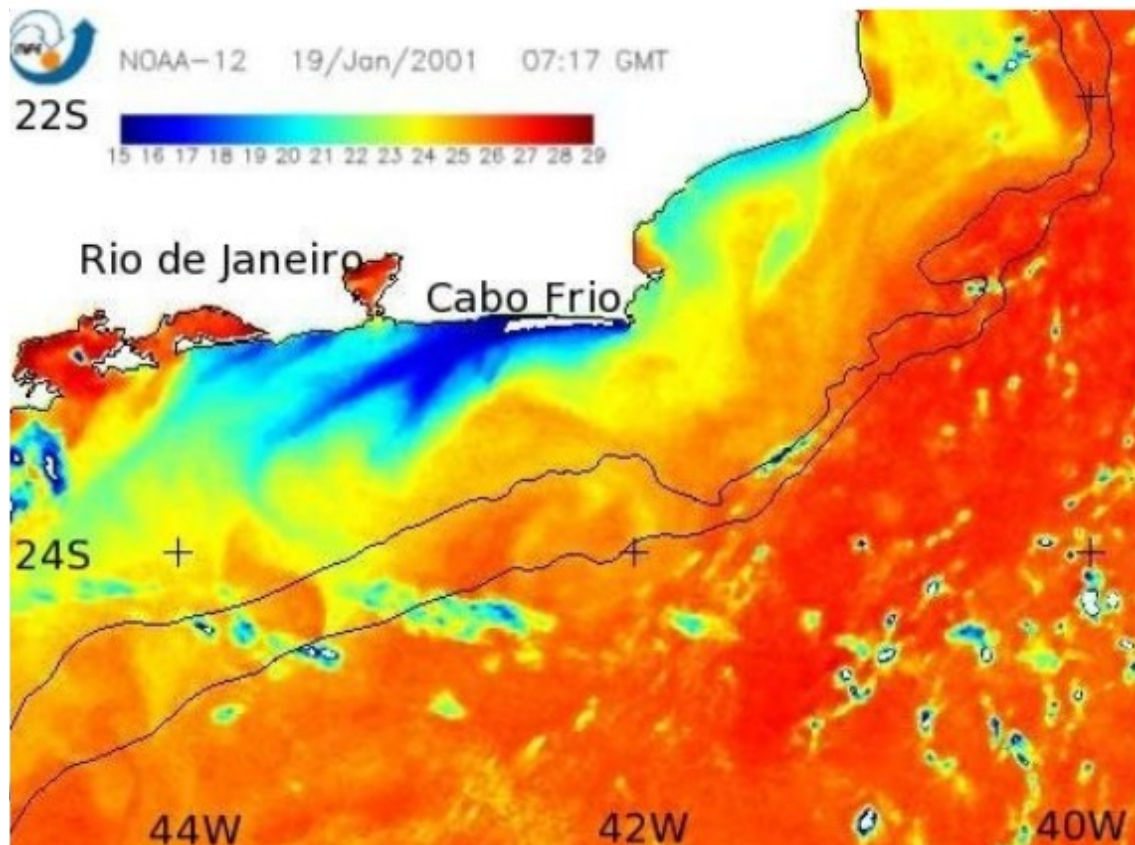
Adicionalmente, el Río de la Plata (RdIP) determina una sustancial dilución de las aguas superficiales de plataforma (ca. 36 °S) y en menor proporción también lo hacen la Laguna Merín y de los Patos. La descarga del RdIP y la Laguna de los Patos forma una lengua de baja salinidad que se extiende hacia el norte, penetrando más en invierno, debido a los vientos del suroeste, que en verano, viéndose intensificado en condiciones de eventos ENOS cálidos.

En el área, se distingue el Frente Subtropical de Plataforma (STSF, 33° S), que divide la plataforma sudoccidental en dos regiones distintas: una región norte con agua cálida, salada y oligotrófica de origen tropical y subtropical, y una región sur con aguas más ricas en nutrientes, de menor salinidad y frías de origen subantártico (Figura 5). Este frente aparece como una extensión de la confluencia de Brasil-Malvinas sobre la plataforma continental, aunque es temática de estudio actual.



**Figura 5-** Temperatura superficial y velocidades promedio de corrientes (flechas). Se muestra el frente subtropical de plataforma (STSF). Imagen tomada de Matano et al. 2010.

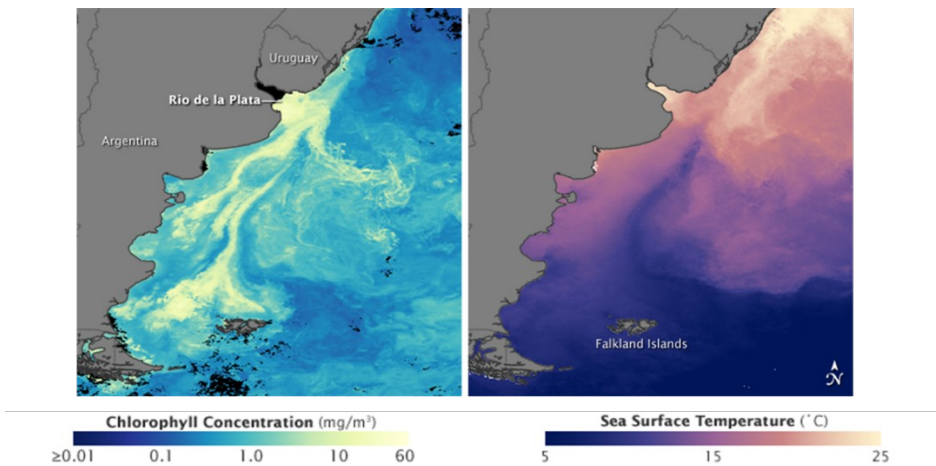
Al NW de la plataforma, en Cabo Frío (~22 °S), se produce una surgencia de aguas más frías con respecto a las circundantes generando un frente térmico superficial cerca de la costa (Figura 6). Esto se debe a que en esa región los vientos predominantes del N-NE quedan paralelos a la costa.



**Figura 6.** Surgencia de Cabo Frío visualizada a partir de imágenes satelitales de temperatura superficial del mar.

Al Sur del STSF, la región de plataforma, está sujeta a grandes descargas de aguas diluidas ( $S < 33.4$ ) que pasan a través del Estrecho de Magallanes y la presencia de la CM en el borde de la plataforma. Un hecho significativo de la región sur es la persistencia del máximo de clorofila que continúa estrechamente la isóbata de los 200m, el frente de borde de plataforma argentina. Los máximos de clorofilas de esta zona son sintomáticos de surgencias de agua ricas en nutrientes, pero el mecanismo de esta surgencia es pobremente entendido (Figura 7).





**Figura 7.** Imágenes satelitales de concentración de clorofila superficial (izquierda) y temperatura superficial (derecha). Se observa el *upwelling* de talud en el quiebre de la plataforma argentina y la elevada concentración de clorofila en esa zona. Imagen obtenida de: <https://earthobservatory.nasa.gov/>

### 3 Circulación en Plataforma Uruguaya

La plataforma uruguaya se encuentra afectada por aguas derivadas de la corriente de Brasil, de Malvinas y de la descarga del Río de la Plata, presentando una fuerte estacionalidad. Durante el verano, la Corriente de Brasil se encuentra en su posición más austral, aguas cálidas en superficie se extienden hasta los 38°S, cubriendo casi uniformemente la plataforma uruguaya. La salinidad en cambio muestra un frente bien definido con aguas diluidas al oeste y salinas al este de las isobatas cercanas a 200-1000 m. En otoño la corriente de Malvinas se vuelve más intensa, mientras que la corriente de Brasil se debilita. Asimismo, la corriente de Malvinas se extiende hasta el norte de la zona más somera de la plataforma uruguaya, situación que se profundiza en invierno. Como resultado, la lengua de aguas frías y diluidas que caracteriza la corriente de Malvinas llega hasta los 33°S. En consecuencia se forma un frente de temperatura y salinidad bien definido entre las isóbatas de 200 y 1000 m que es máximo en invierno.

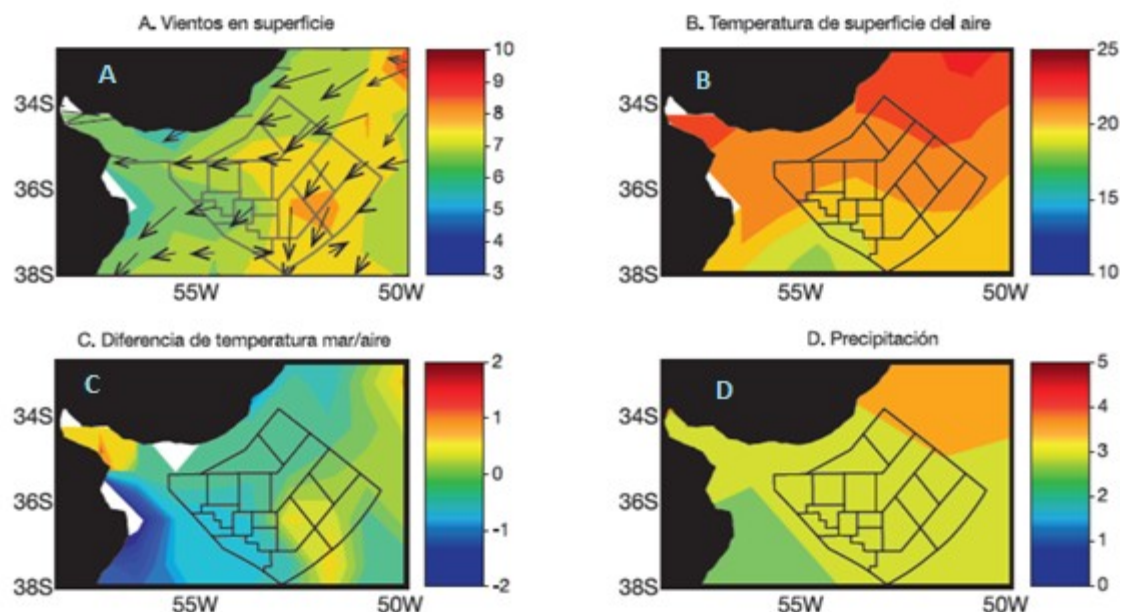
### 4 Interacción océano-atmósfera en la plataforma

La atmósfera y los océanos interactúan mediante flujos de momento, calor y agua. El esfuerzo tangencial de los vientos sobre la superficie transfiere energía cinética desde el aire al agua dando lugar a la

circulación oceánica en las capas menos profundas las cuales inciden en el movimiento de las capas más profundas.

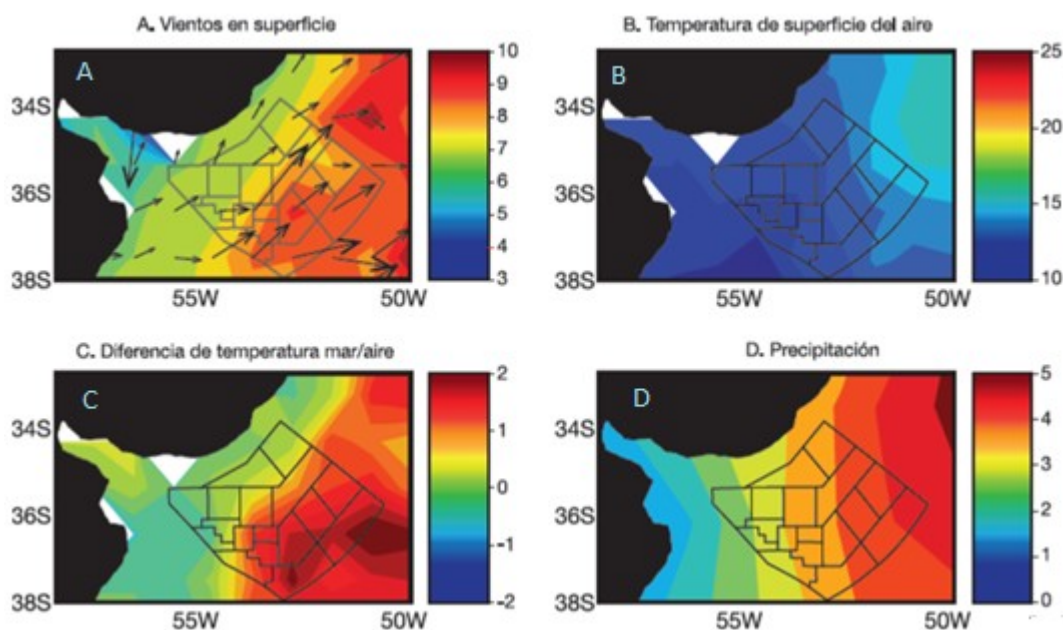
Por otro lado, la temperatura y humedad del aire determinan, junto al viento, los flujos de calor que contribuyen a la distribución de temperatura en las capas superficiales del mar y de ciertas regiones en la atmósfera. El intercambio energético mar-aire se produce en la capa límite atmosférica marina. Un indicador de la estabilidad de la capa límite es la diferencia de temperatura entre el mar y el aire en la superficie ( $T_{\text{mar}} - T_{\text{aire}}$ ). Valores positivos indican una estratificación inestable que estimula la turbulencia atmosférica y el flujo de calor desde el mar a la atmósfera pues el aire se calienta y absorbe vapor de agua. Este calor y humedad se propagan hacia porciones más altas de la capa límite y de ahí a la atmósfera libre produciéndose la formación de nubes y lluvias. Valores negativos muestran una estratificación estable e indican que la atmósfera está siendo enfriada, condiciones que propician la formación de nieblas o nubosidad de tipo stratus.

En verano (DEF) los vientos soplan del noreste-este con mayor intensidad a medida que nos alejamos de la costa. Estos vientos forman parte del anticiclón del Atlántico sur que se encuentra en su posición más austral. La temperatura de superficie del aire es cálida con temperaturas máximas al norte, cercanas a los 23 °C, mientras que las temperaturas de superficie en el océano tienden a ser relativamente más frías contra la costa y más cálidas al este de 53 °W. Así se generan flujos de calor sensible y latente desde el océano a la atmósfera principalmente al este de 53 °W. Las lluvias en el período estival muestran un gradiente latitudinal siendo máximas en la región norte (Figura 8).



**Figura 8.** Condiciones medias en verano de las variables: A) dirección e intensidad del viento en superficie ( $\text{m.s}^{-1}$ ), B) temperatura en superficie del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ), C) diferencia de temperatura entre el mar y el aire ( $T_{\text{mar}} - T_{\text{aire}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ), D) precipitación ( $\text{mm.día}^{-1}$ ). Imágenes obtenidas de UDELAR & Ancap (2014).

En invierno, los vientos soplan desde el SW, mientras que la temperatura del aire muestra sus valores más fríos cercanos a los  $13^{\circ}\text{C}$ , el océano está más cálido que la atmósfera en la región este y con valores similares a la atmósfera en la región costera. Las lluvias muestran un gradiente longitudinal muy marcado con valores mayores a los  $4 \text{ mm/día}$  en el este y casi nulos en la región oeste (Figura 9).



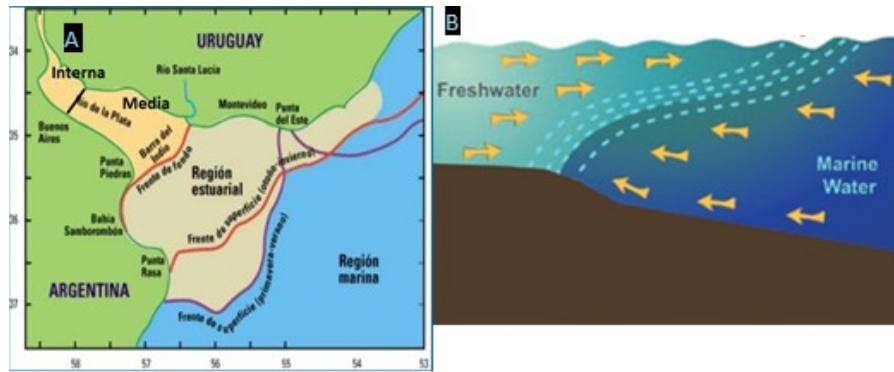
**Figura 9.** Condiciones medias en invierno de las variables: A) dirección e intensidad del viento en superficie ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), B) temperatura en superficie del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ), C) diferencia de temperatura  $T_{\text{mar}}-T_{\text{aire}}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), D) precipitación ( $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ ). Imágenes obtenidas de UDELAR & Ancap (2014).

## 5 Río de la Plata

El RdIP vierte al Océano Atlántico unos  $22.000 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $0.022 \text{ Sv}$ ) constituyendo así unos de los mayores estuarios del mundo (estuario es la región donde un río desemboca en el mar). Éste se origina a partir de las convergencias del Río Paraguay con el Paraná y luego éste con el Río Uruguay. El agua que tributa el RdIP transporta gran cantidad de sedimentos, nutrientes y detritos orgánicos, por lo que el río fertiliza la región costera del océano

En el RdIP se distinguen tres zonas: interna, media y externa o estuarial. La zona interna abarca desde el inicio hasta la línea imaginaria que une a Colonia con La Plata en Argentina; allí las aguas son predominantemente dulces y de baja profundidad (aprox.  $3 \text{ m}$ ). La zona intermedia se extiende desde Punta Piedras (extremo N de Bahía de Samborombón) hasta Punta Brava (cercano a Montevideo), en este tramo las aguas comienzan a ser más salobres. Finalmente, la zona externa (o estuarial) llega hasta la línea que une Punta Rasa en Argentina con Punta del Este en Uruguay, este tramo posee aguas más salinas y profundas. Estos límites son impuestos en función de la influencia marina promedio que presenta grandes variaciones estacionales e interanuales según los vientos y las descargas (sobre todo el límite externo de la región estuarial, Figura 10A).

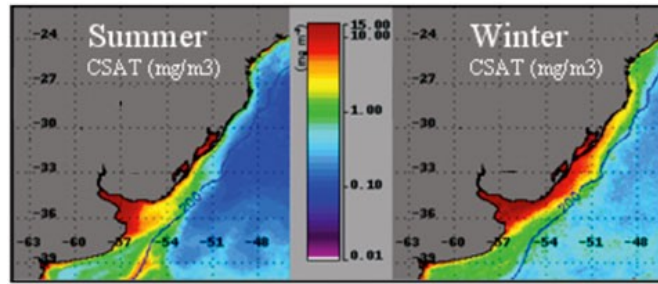
La descarga del RdIP en el océano determina la formación de frentes de salinidad. En general, las aguas oceánicas más densas fluyen por debajo y el agua que proviene del continente, que es menos densa, fluye en superficie. Así, se forma una estructura de “cuña” salina que se visualiza en la figura 10B. Se puede distinguir dos regiones frontales, una en el fondo que marca el límite interior de la región estuarial y otra en superficie (Figura 10B).



**Figura 10.** A) Estuario del Río de la Plata, se muestran las regiones interna, media y externa o estuarial. B) Esquema del frente formado por la descarga de aguas del estuario, donde se observa la estructura de “cuña”, con el agua estuarina menos densa fluyendo hacia el océano sobre el agua marina más densa. Imagen obtenida de Acha et al. 2015.

Existe estacionalidad en la distribución espacial de la descarga del Río de la Plata (Figura 11), la cual es principalmente forzada por los vientos y en menor medida por la descarga de agua dulce. En otoño - invierno actúan vientos que soplan predominantemente desde el SW. De esta manera la pluma es afectada por Coriolis y su dirección es desviada hacia la izquierda, paralela a la costa. Así se genera un flujo N-NE de las aguas estuarinas sobre la costa uruguaya, que en eventos de elevada descarga continental (e.g. en condiciones de eventos ENOS cálidos) puede llegar al N de los 32°S.

Durante primavera-verano, los vientos del N-NE (hacia la costa se vuelven dominantes en la región), de esta manera el flujo del RdIP afectado por Coriolis es desviado hacia el Sur, contra la costa argentina. Adicionalmente, la persistencia de vientos N-NE favorece la ocurrencia de eventos de surgencia en la costa uruguaya entre Punta del Este y Cabo Polonio. Asimismo, en condiciones de viento E también se favorece la ocurrencia de eventos de surgencia, pero en torno a Montevideo y Punta del Este.



**Figura 11.** Distribución superficial de la salinidad. Se observa la pluma de descarga para verano e invierno. Imagen obtenida de Piola & Romero 2004.

## Referencias

Acha, E. M., Piola, A., Iribarne, O., Mianzan, H., 2015. Ecological Processes at Marine Fronts. Oases in the Ocean. Springer, 68P DOI 10.1007/978-3-319-15479-4.

Franco, B. C., Piola, A. R., Rivas, A. L., & Palma, E. D. (2009). La corriente de Malvinas. Ramas y frentes oceánicos en el mar patagónico. *Ciencia Hoy*, 19(114), 26-31.

Matano, R.P.; Palma, E.D. & Piola, A.R. 2010. The influence of the Brazil and Malvinas Currents on the Southwestern Atlantic Shelf circulation. *Ocean Science*, 6:983-95.

Piola, A. R, Romero, S., 2004. [Analysis of space-time variability of the Plata River Plume](#) . *Gayana (Concepción)* 68 (2), 482-486.

Piola A.R., Bianchi A.A., Rivas A.L., Palma E.D., Matano R.P. & Bleck R. The Brazil-Malvinas Confluence. <http://www.po.gso.uri.edu/wbc/Piola/bmc.htm#1.%20>

Saraceno, M., Simionato, C. G., & Ruiz Etcheverry, L. A. (2012). La Corriente de Malvinas y su rol en el clima de la Tierra. *Revista del instituto geográfico nacional*.

Tomczak, M., & Godfrey, J. S. (2005). Regional oceanography: an introduction. Elsevier. UDELAR-ANCAP, 2014. Programa Oceanográfico de caracterización del margen continental uruguayo-ZONA ECONÓMICA EXCLUSIVA. Revisión Bibliográfica, 381p.