

Circulación oceánica en el Atlántico Suroccidental

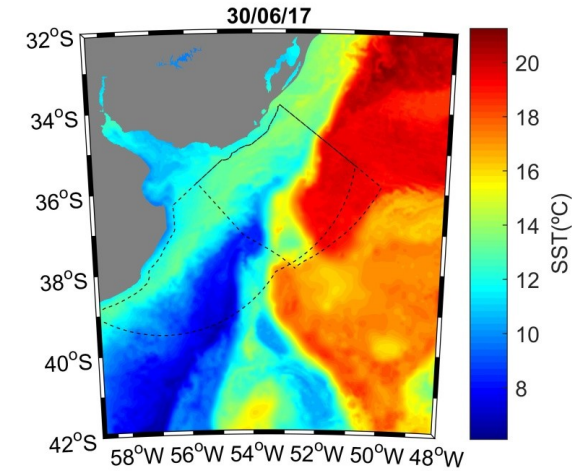
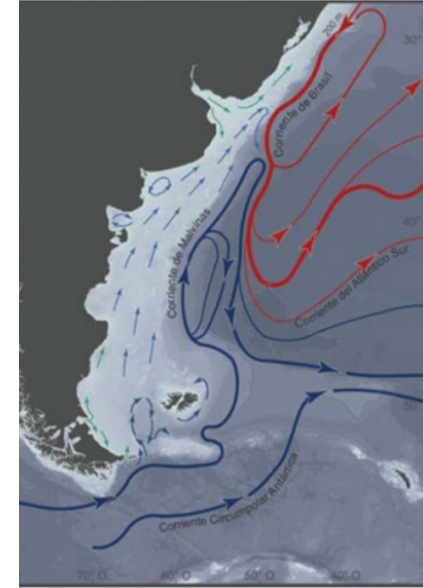
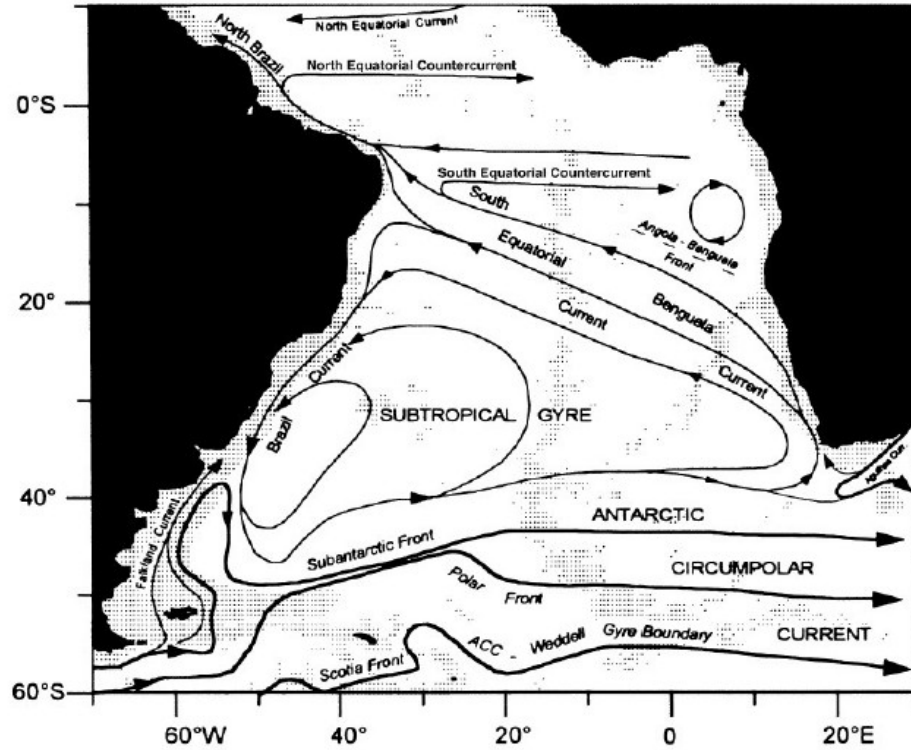
Curso 2025

Facultad de Ciencias

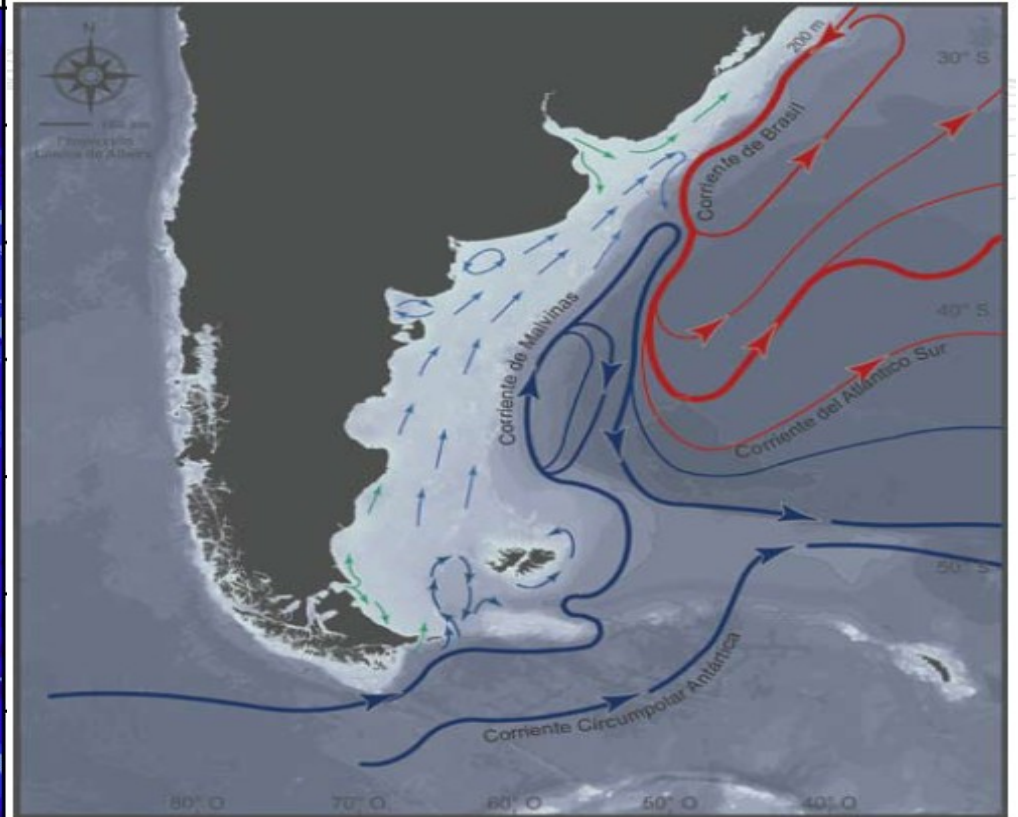
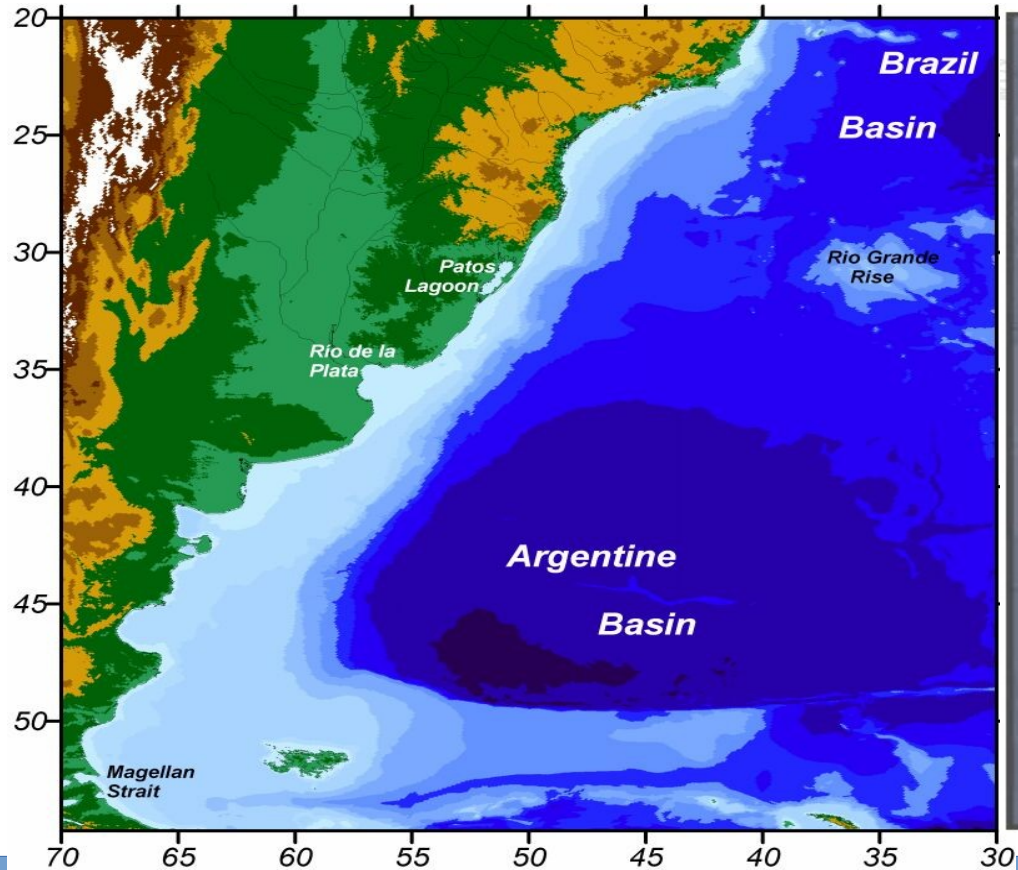
Universidad de la República



Departamento de Ciencias de la Atmósfera
y Física de los Océanos



Corriente de Brasil (AT y AST AAI)
Corriente de Malvinas (ASA AAI)



Corriente de Brasil

- La CB se extiende hacia el sur a lo largo del talud
- Es baroclínica (la velocidad varía con Z, viento térmico), genera inestabilidades se generan meandros y eddies.
- Transporta masas de agua:
 - a) Agua Tropical (TW, $T > 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $S > 36$) hasta los 200m
 - b) Agua Central de Atlántico Sur o Agua subtropical (SACW o STW, $6\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $34,6 < S < 36$).



Corriente de Malvinas

- Se origina de la rama norte de la Corriente Circumpolar Antártica
- Aguas relativamente diluidas y frías
- Fluye por el talud hacia le N, hasta que alcanza a la CB

Transporta

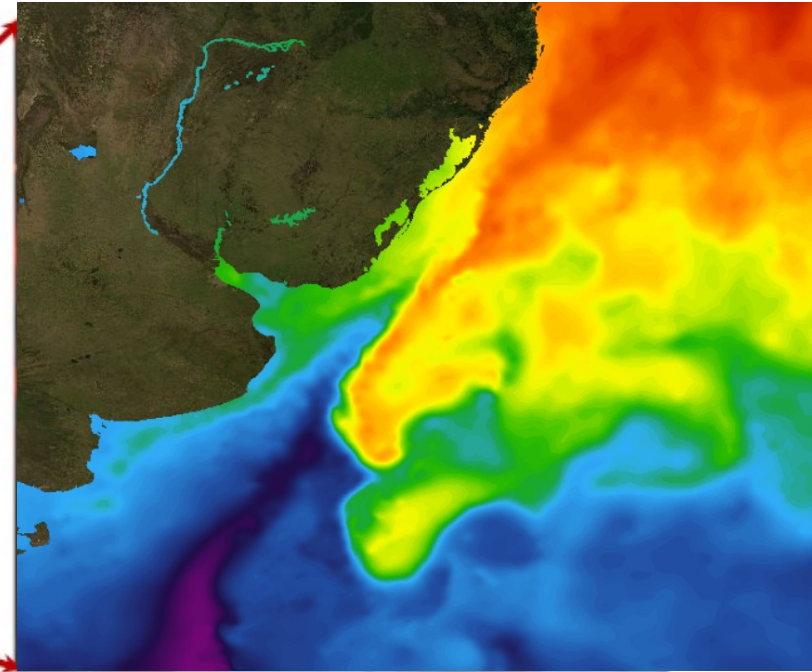
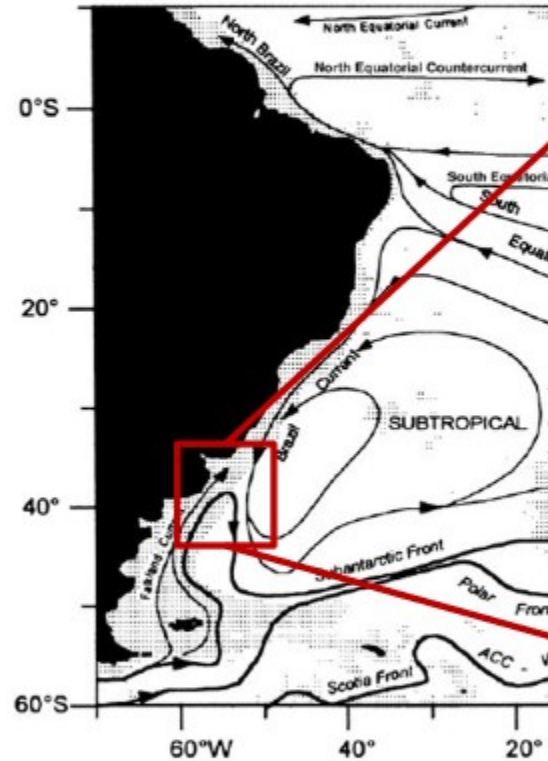
Aguas subantárticas: $2^{\circ}\text{C} > T < 8^{\circ}\text{C}$, son aguas ricas en oxígeno y nutrientes y Agua antártica Intermedia.

- La zona donde ocurre es altamente productiva debido a que allí ocurre un proceso de surgencia.



Confluencia Brasil-Malvinas (~38°S)

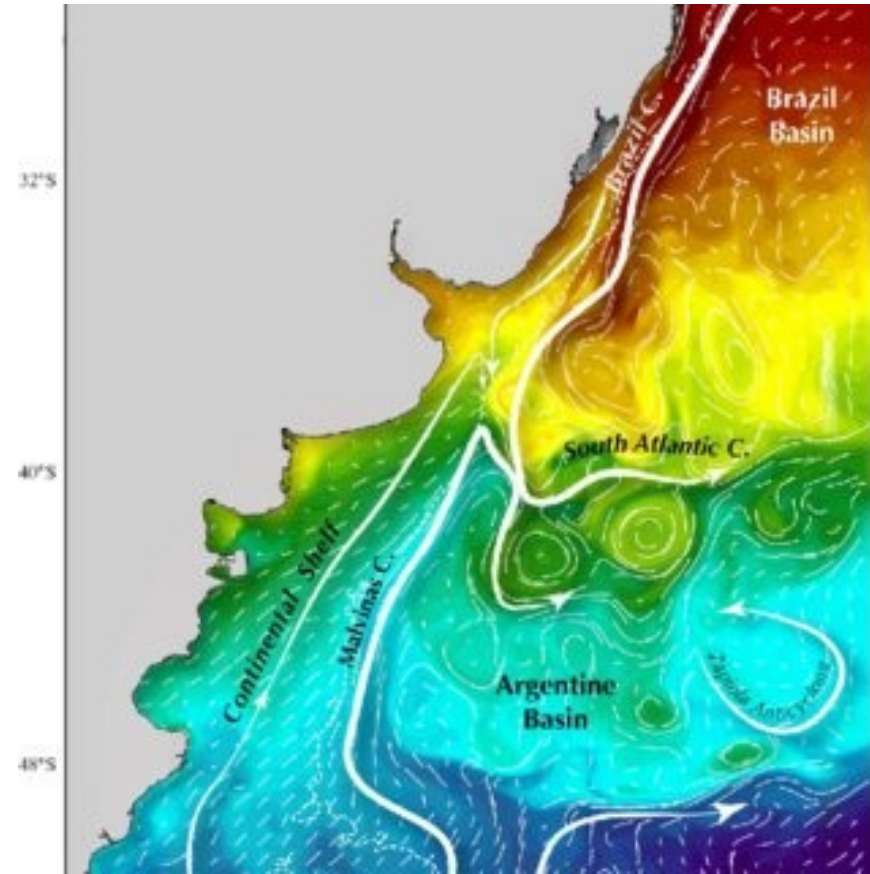
CIRCULACIÓN EN EL ASO



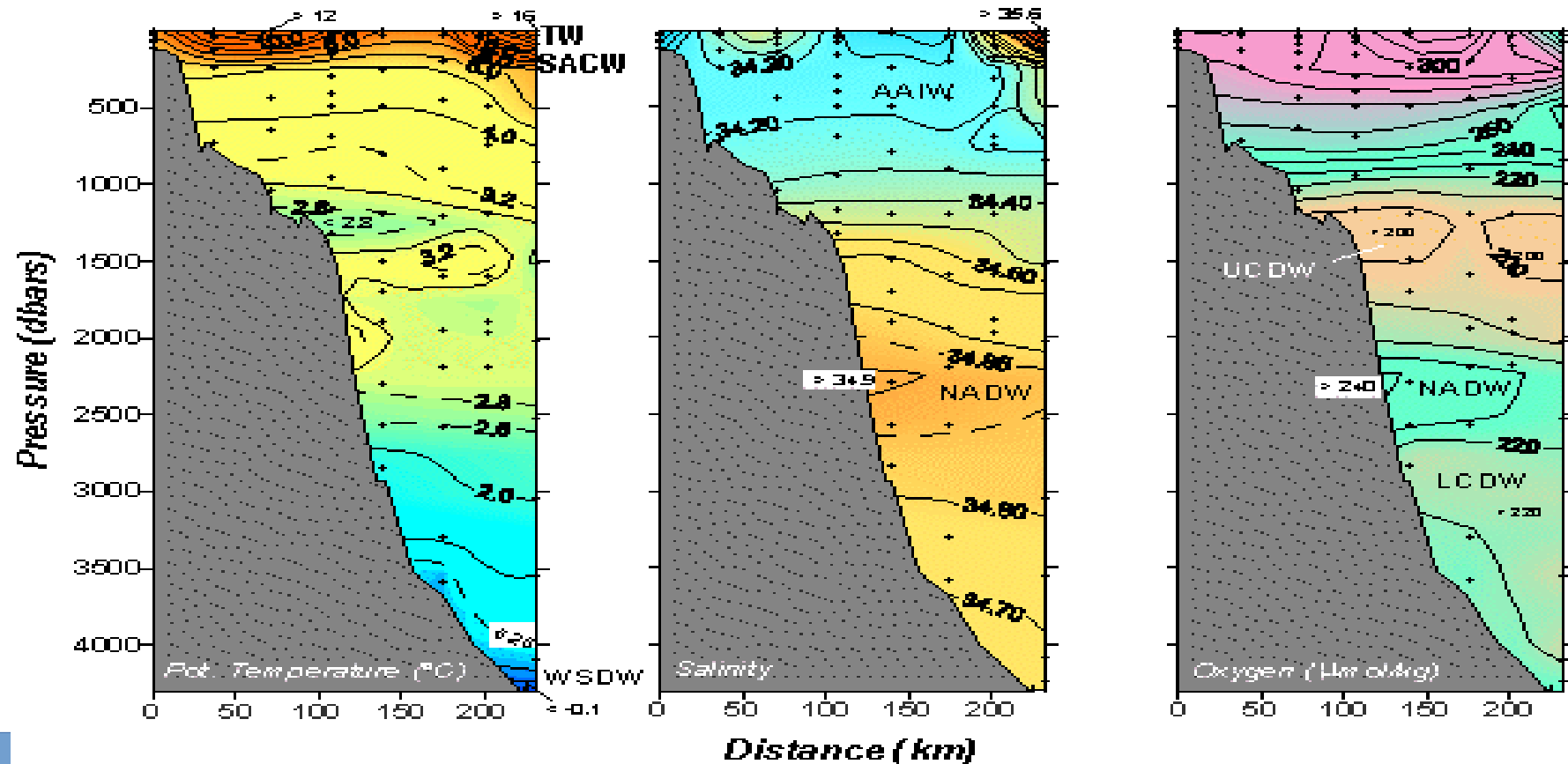
- Característica oceanográfica que más se destaca en la región
- Zona de convergencia de masas de aguas de diferentes características.
- Es una de las zonas más energéticas del océano global.

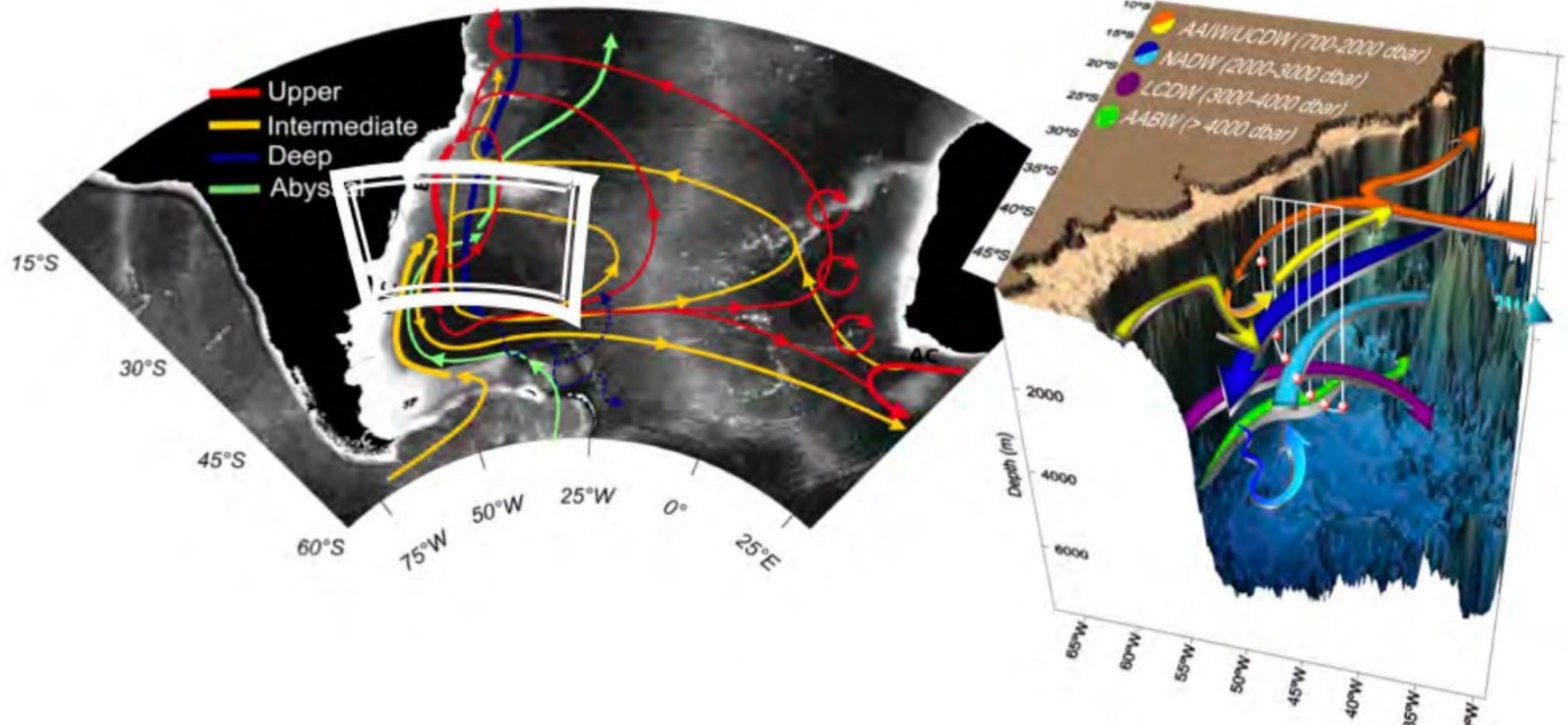
La convergencia genera inestabilidades y desprendimientos de eddies con características térmicas y halinas diferentes a las aguas circundantes.

Los eddies de núcleo cálido pueden tener una anomalía de T de 10°C , duración de dos meses y hasta 500km de diámetro.

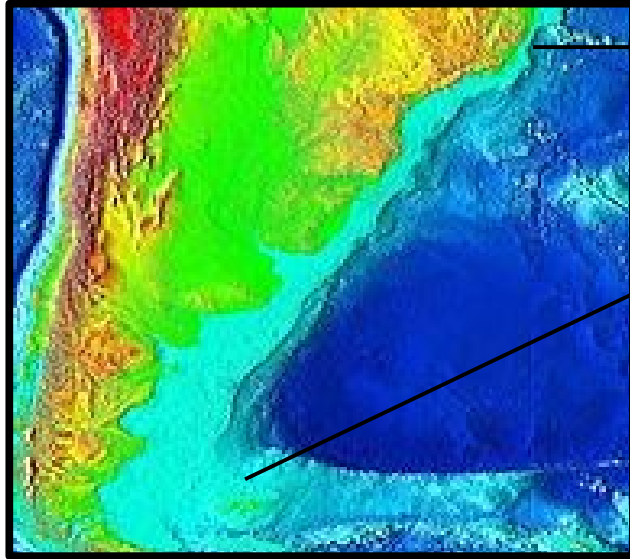


La confluencia de Brasil Malvinas determina una compleja estructura vertical de masas de agua sobre la plataforma del ASO.





PLATAFORMA DEL ASO



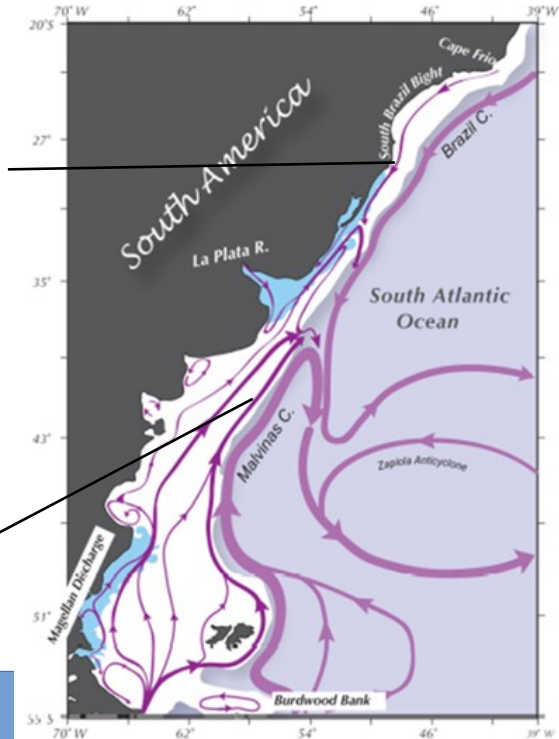
La plataforma del ASO se extiende desde Cabo Frío (23°S)

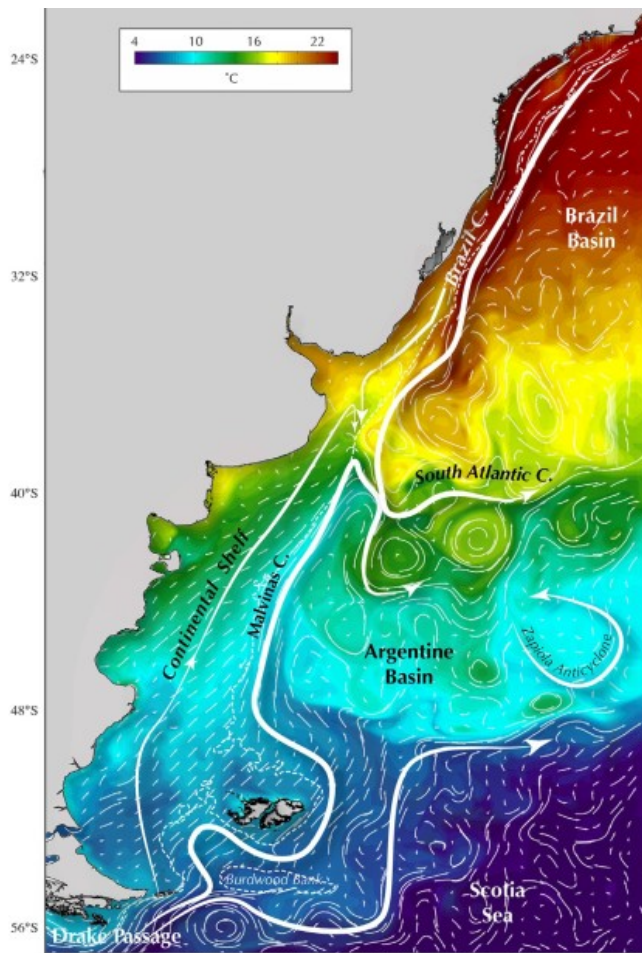
al Banco Burdwood (55°S).

Flujo hacia el S de aguas cálidas

Se ensancha hacia el Sur, llegando a 860km

Flujo hacia el N de aguas frías





Región Norte 23-28°S: Limita al Este por la CB quien ejerce influencia sobre la circulación en plataforma.

Región Central 28-38°S: Fuertemente influenciada por la descarga del RdP y Laguna de los Patos y su proximidad a la BC y a la CBM que limitan offshore y generan intercambios entre plataforma y aguas oceánicas.

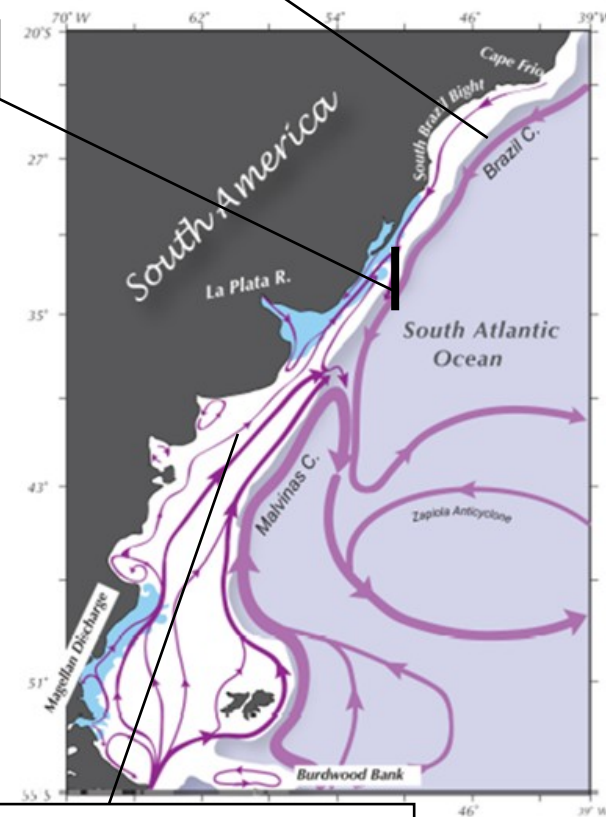
Región Sur 38-55°S : La Plataforma patagónica es ancha e influenciada por los vientos del W y amplia amplitud de marea. Se encuentra limitada offshore por aguas de la CCA que son advectadas al N por la CM sobre el talud.

MASAS DE AGUA

- Agua Subantártica de Plataforma (SASW)
 - Dilución de SAW en el Pacífico Sur por exceso de pp y escorrentía superficial
- Agua Subtropical de Plataforma (STSW)
 - Mezcla entre TW SACW y PPW
- Aguas costeras ($S < 33.5$)
 La descarga del RdIP y la Laguna de los Patos forma una lengua de baja S que determina una dilución adicional de las aguas superficiales de plataforma

Flujo hacia el S de aguas cálidas

FSP



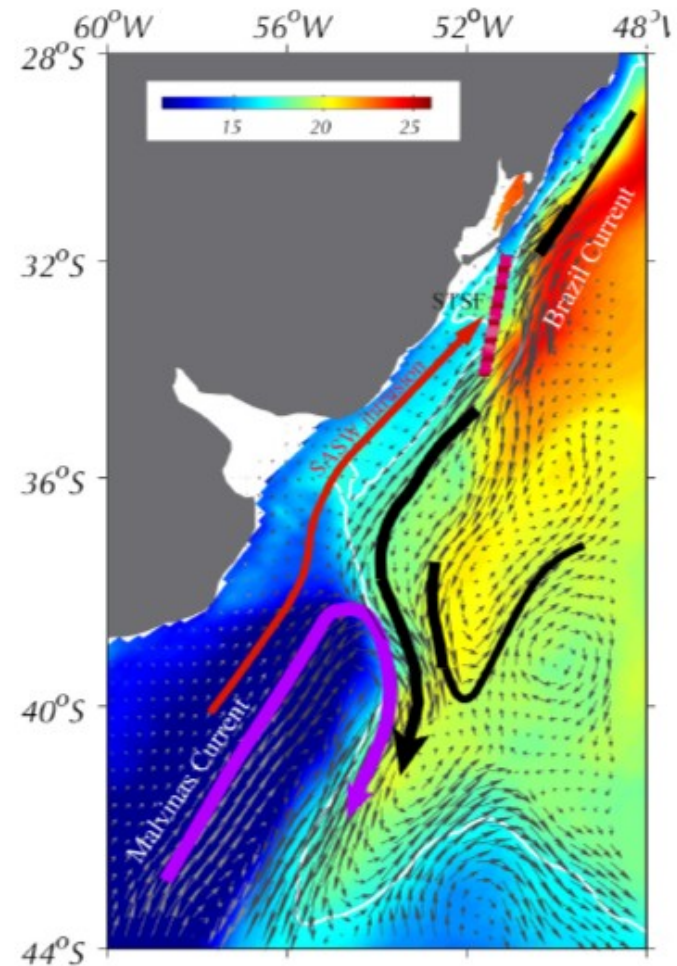
Flujo hacia el N de aguas frías

FRENTE SUBTROPICAL DE PLATAFORMA

Su límite N (33°S) se encuentra en aguas someras sobre plataforma

En su progreso hacia el S se acerca hacia el borde de la plataforma del ASO, hasta los $\sim 36^{\circ}\text{S}$ donde deja la plataforma

Está presente desde casi superficie (donde está “cubierto” por el agua de baja S del RdIP y la Laguna de los Patos) hasta el fondo.

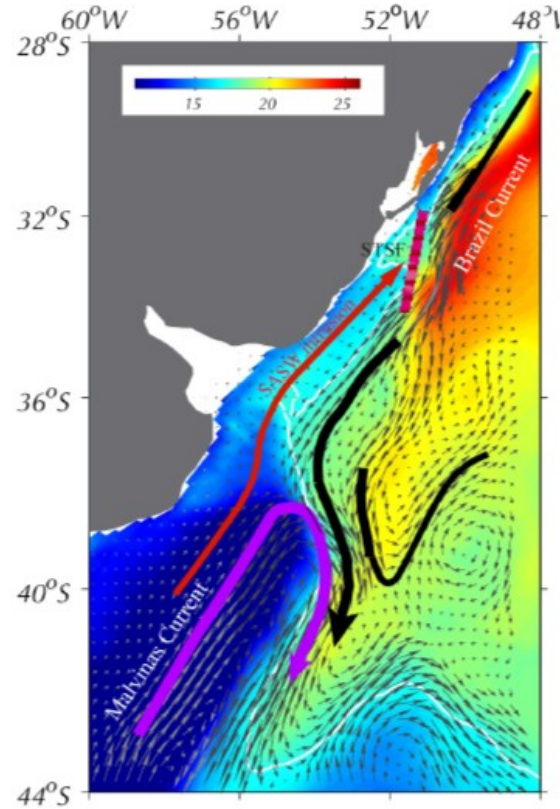


FRENTE SUBTROPICAL DE PLATAFORMA

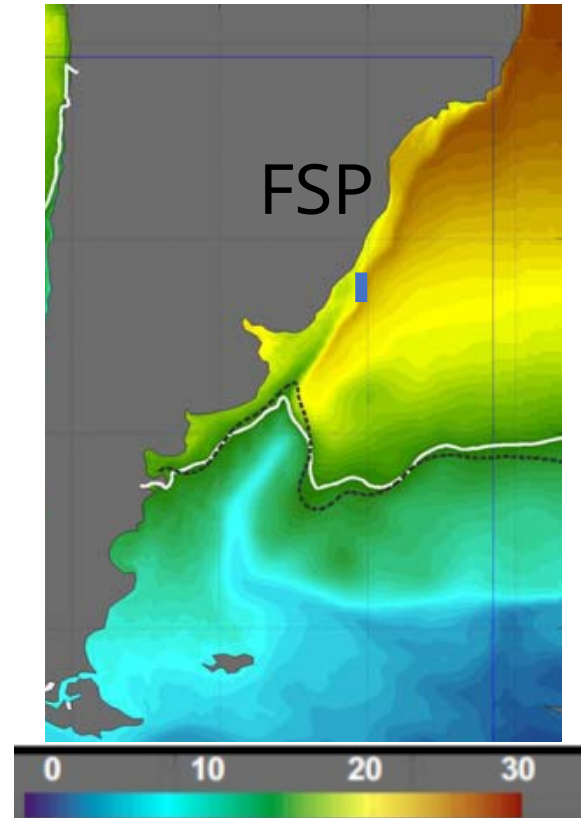
- Extensión de la CBM en la plataforma
- Localizado isobata 50m
- Divide la plataforma en dos regiones :

Norte: agua cálida, salada y oligotrófica de origen tropical y subtropical

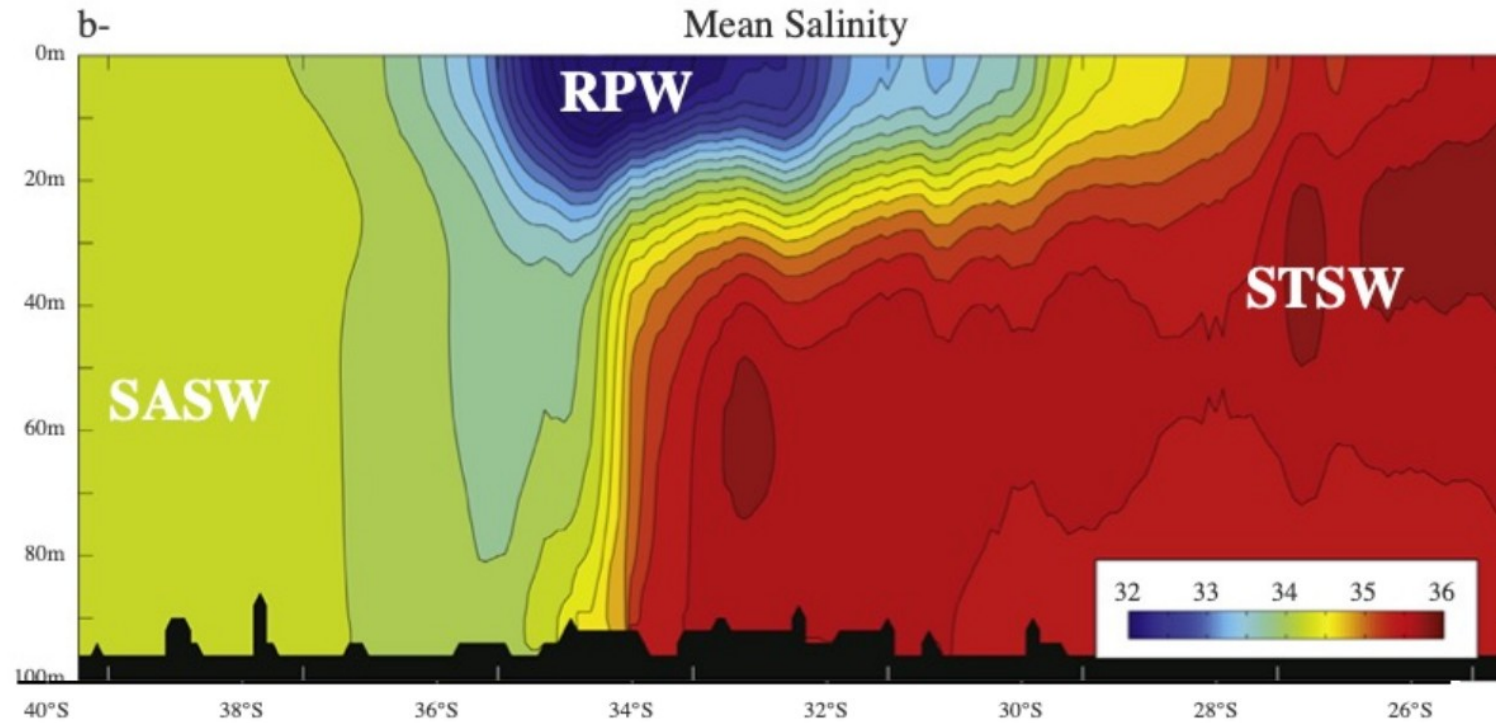
Sur: agua rica en nutrientes, menor salinidad y frías de origen subantártico

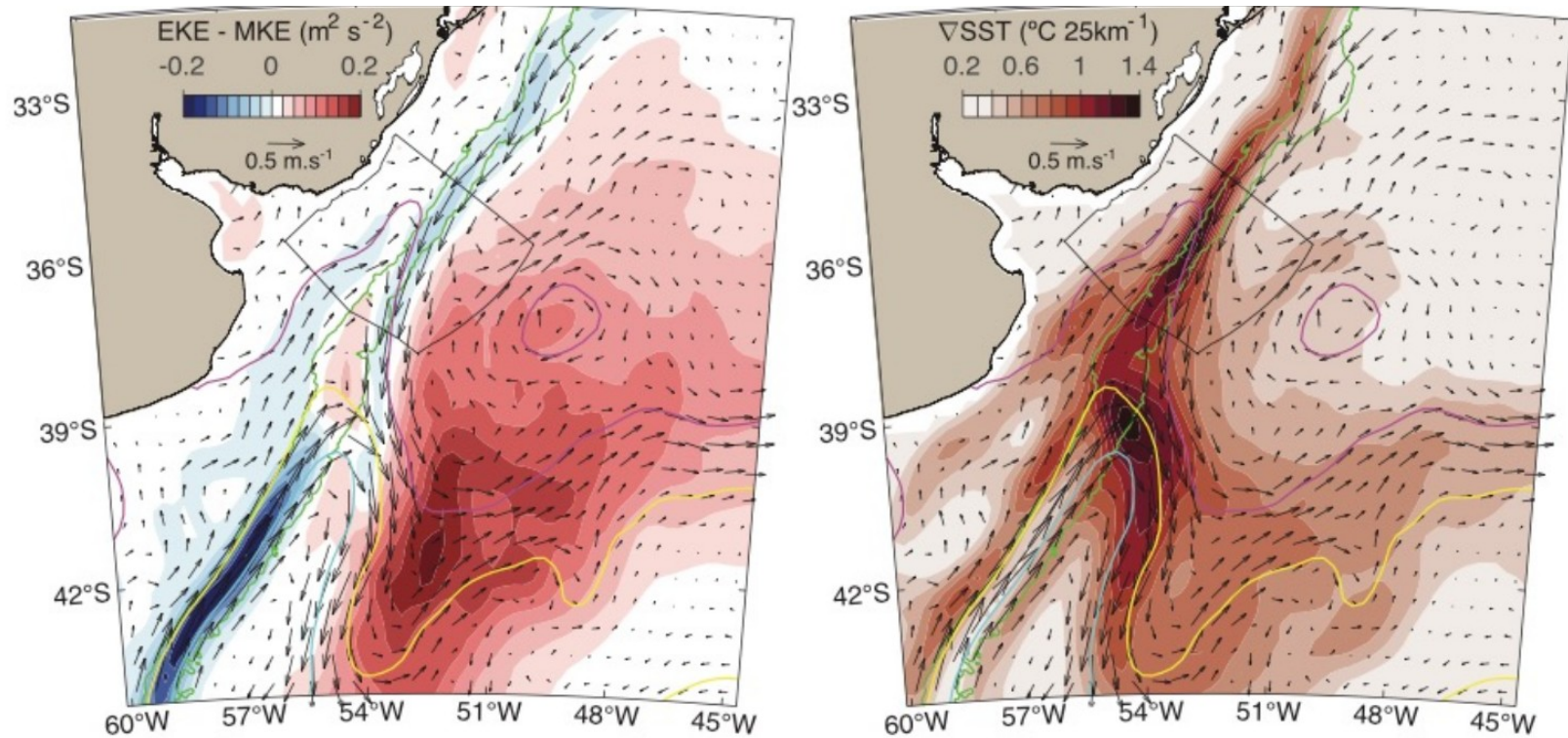


PLATAFORMA DEL ASO



Sobre isóbata de 100 m

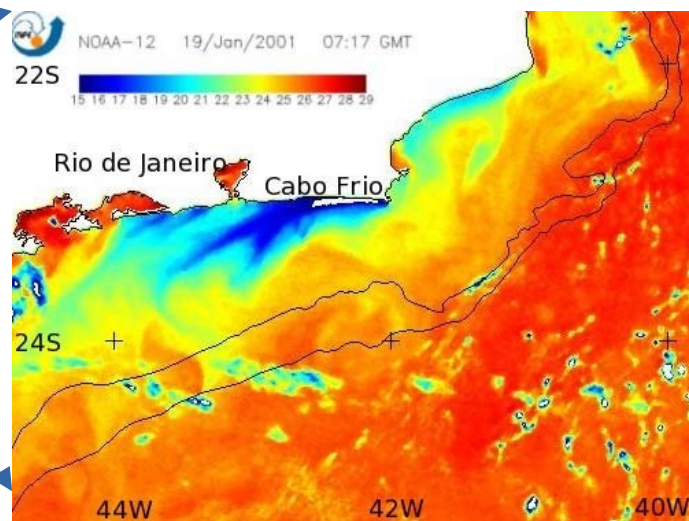
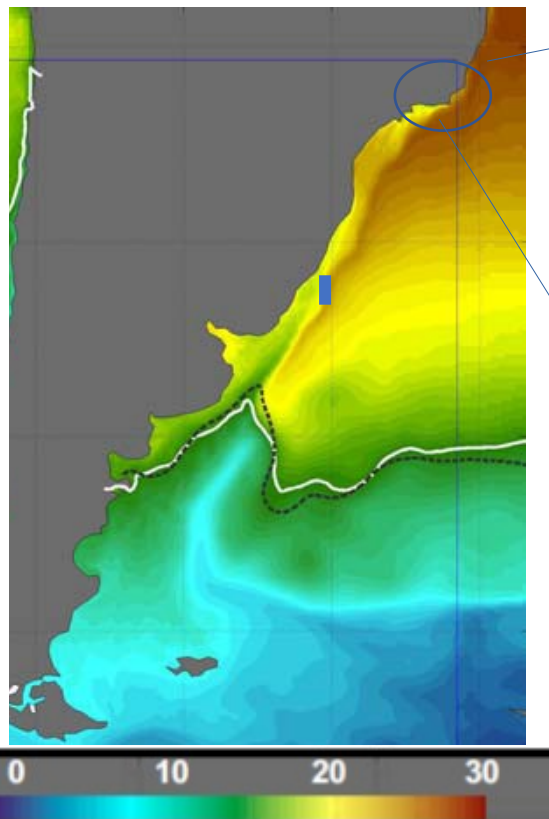




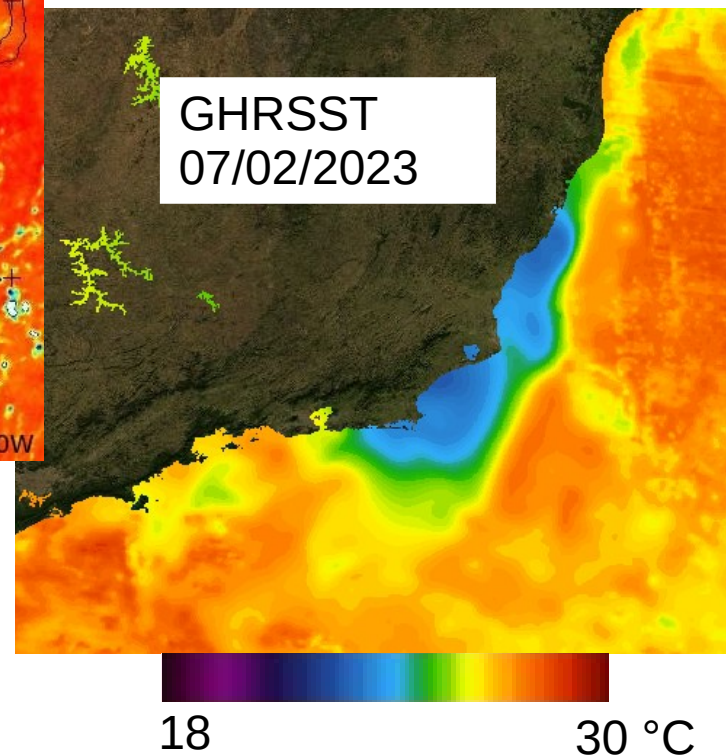
EL STSF y la CBM forman un continuo

REGIÓN NORTE PLATAFORMA ASO

Surgencia Cabo Frío



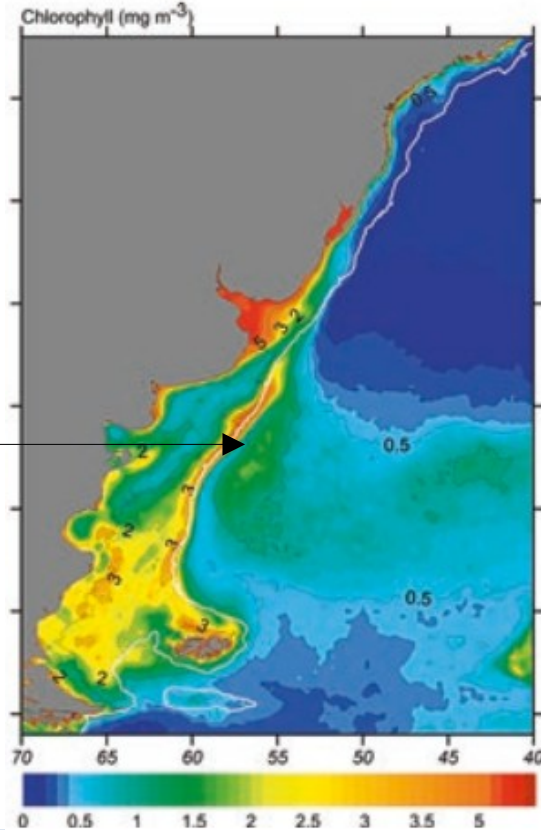
AVHRR
10/01/2001



REGIÓN SUR PLATAFORMA ASO

Máximos de cloa indican surgencia de agua rica en nutrientes: surgencias de quiebre de talud

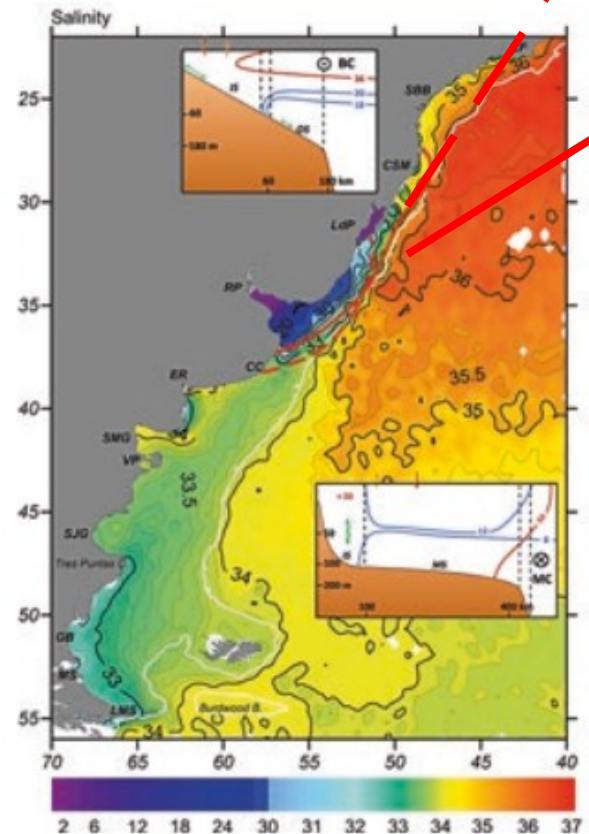
Máximo de Clo a sobre la isobata de los 200m



PLATAFORMA DEL ASO

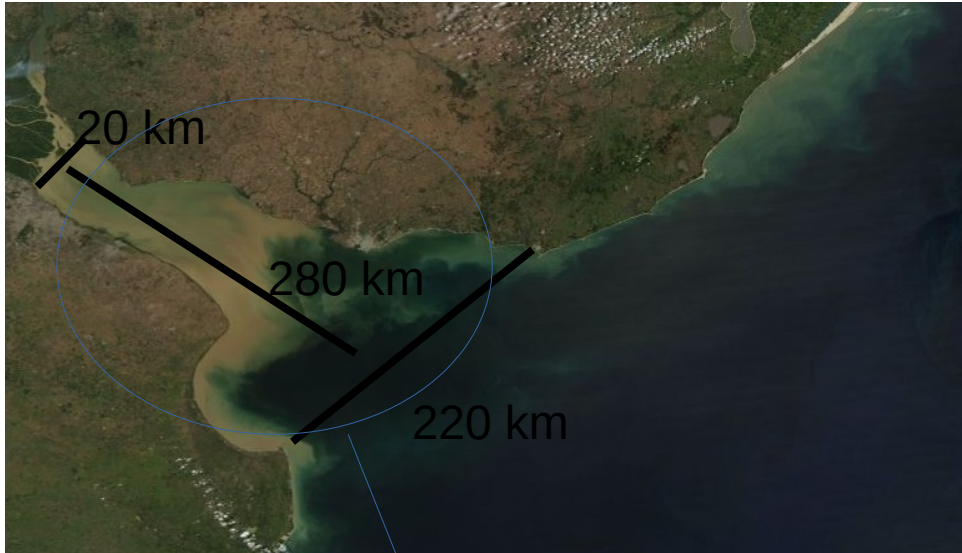
Isohalina 33.5
Invierno

Verano



Piola et al. 2018

PLATAFORMA URUGUAYA



35.000km²

- Destaca la presencia del del RdP con el mayor flujo de agua dulce del área (~34°S)
 - Descarga promedio de 25.000m³s⁻¹
- El caudal depende de ríos Paraná y Uruguay

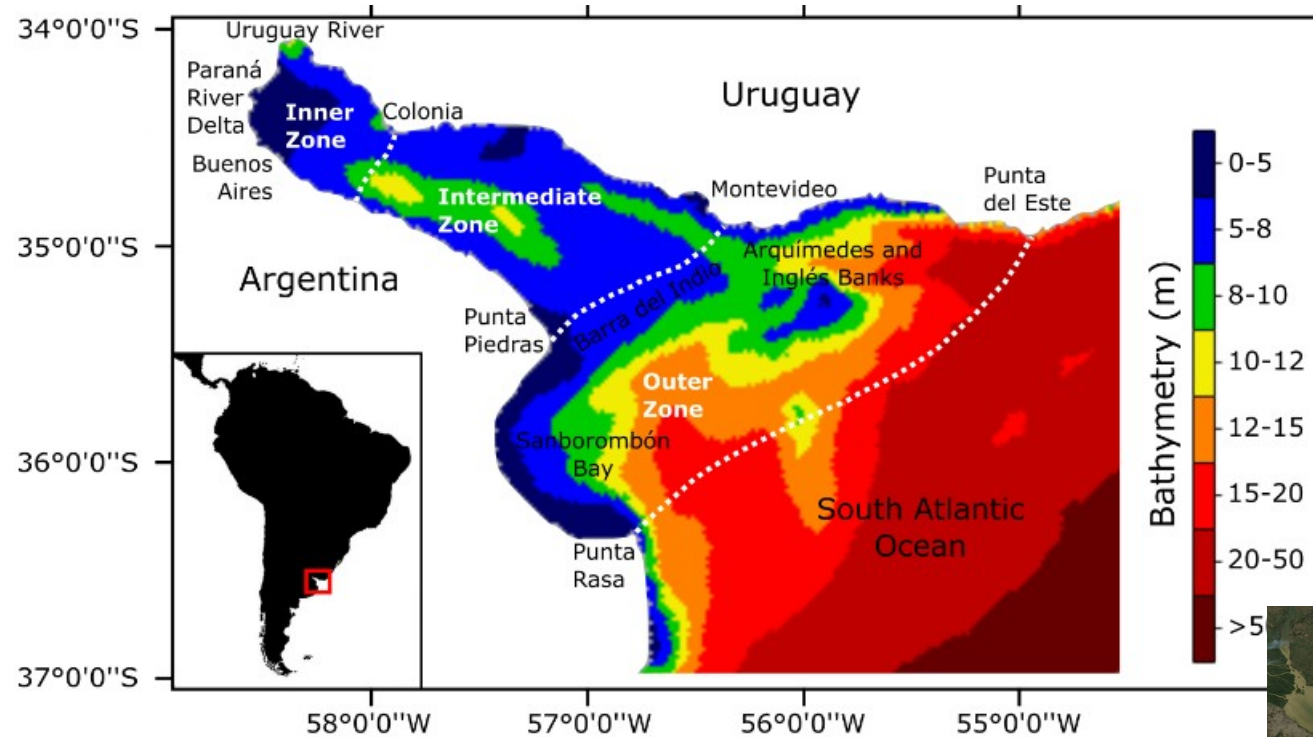
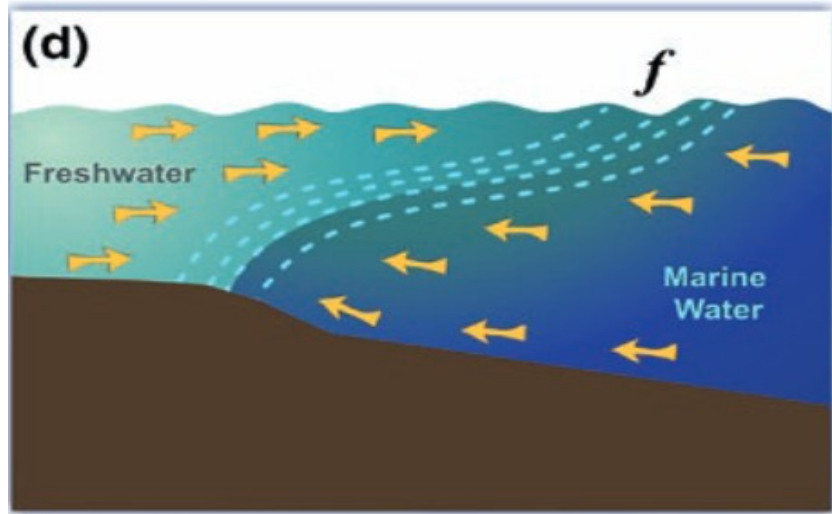


Figure 1: The Río de la Plata estuary, located between Uruguay and Argentina. Its bathymetry and some characteristic features are indicated.



FRENTES: Frentes salino



PLATAFORMA URUGUAYA



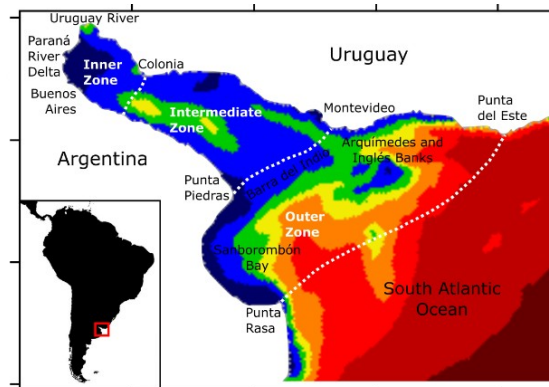
El agua de plataforma forma una cuña bajo la descarga continental.

- El máximo gradiente de turbidez: floculación de material en suspensión en el límite de la intrusión salina por el fondo
- **En superficie**
Se forma una pluma de descarga y frentes costeros en el estuario

Frente de turbidez

“La frontera de la influencia del agua dulce turbia”

Ubicación media sobre la barra del indio.



El estrés del fondo así como la composición del fondo influyen en la localización del frente de turbidez.



Frente de turbidez

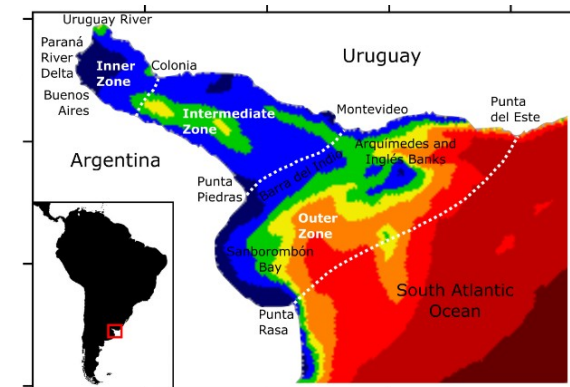
“La frontera de la influencia del agua dulce turbia”

Ubicación media sobre la barra del indio.

Motivos

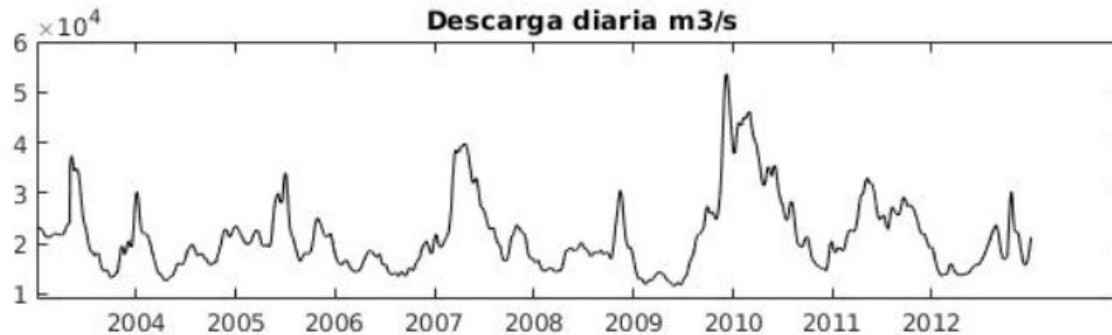
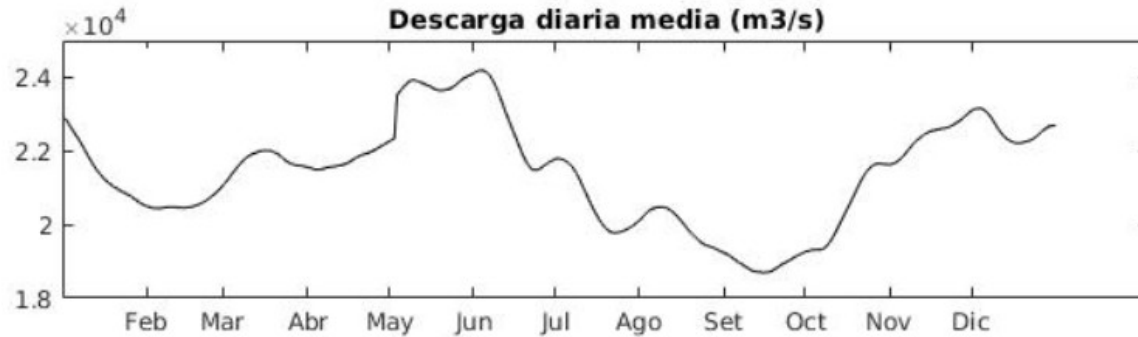
- Dinámico, se ensancha en río, se profundiza en lentece y los sedimentos decantan
- Físico-químico: Flocculación.

En contacto con la sal sedimentos se agregan entre sí, formando flóculos densos que decantan



CAUDAL DEL RDP

No presenta gran variabilidad
estacional en el caudal



Gran variabilidad
interanual:

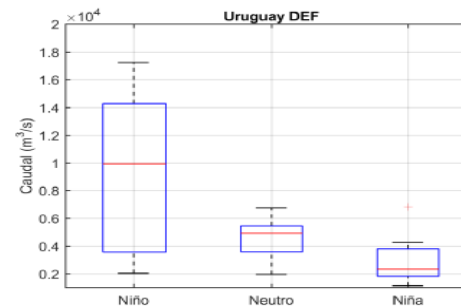
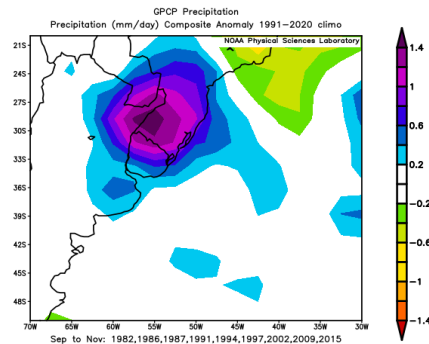
eventos ENOS

CAUDAL DEL RDP



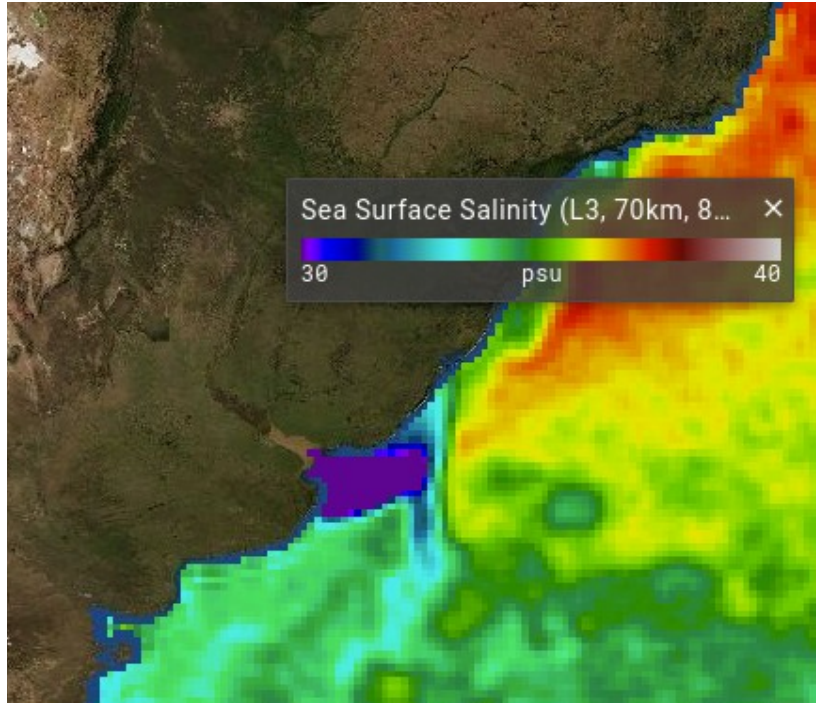
Gran variabilidad
interanual:

eventos ENOS



El Niño

Mayores precipitaciones → Mayor descarga RdP



SMAP/REMSS 17/02/2016

Caudal $49.000\text{m}^3\text{s}^{-1}$

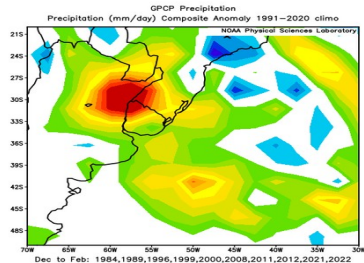
Filamentos de la
descarga del RdP
pueden alcanzar la
zona de la CBM
durante El Niño

CAUDAL DEL RDP

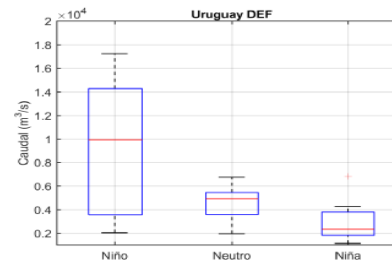


Gran variabilidad
interanual:

eventos ENOS

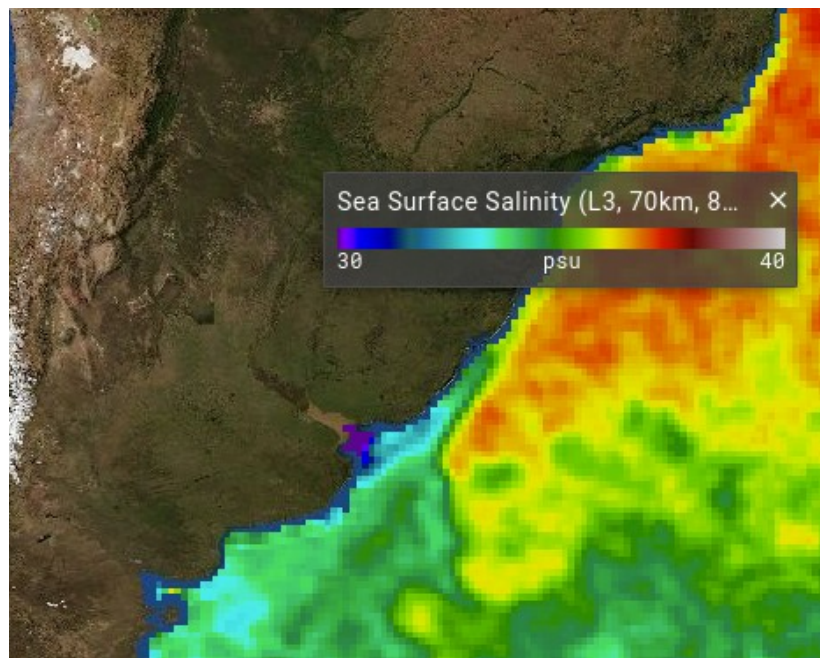


Menores precipitaciones → Menor descarga RdP



Durante La Niña:

PP durante primavera y
verano sobre el SE de
Sudamérica disminuyen,
afectando la descarga
del RdIP



SMAP/REMSS 17/02/2022

VIENTOS

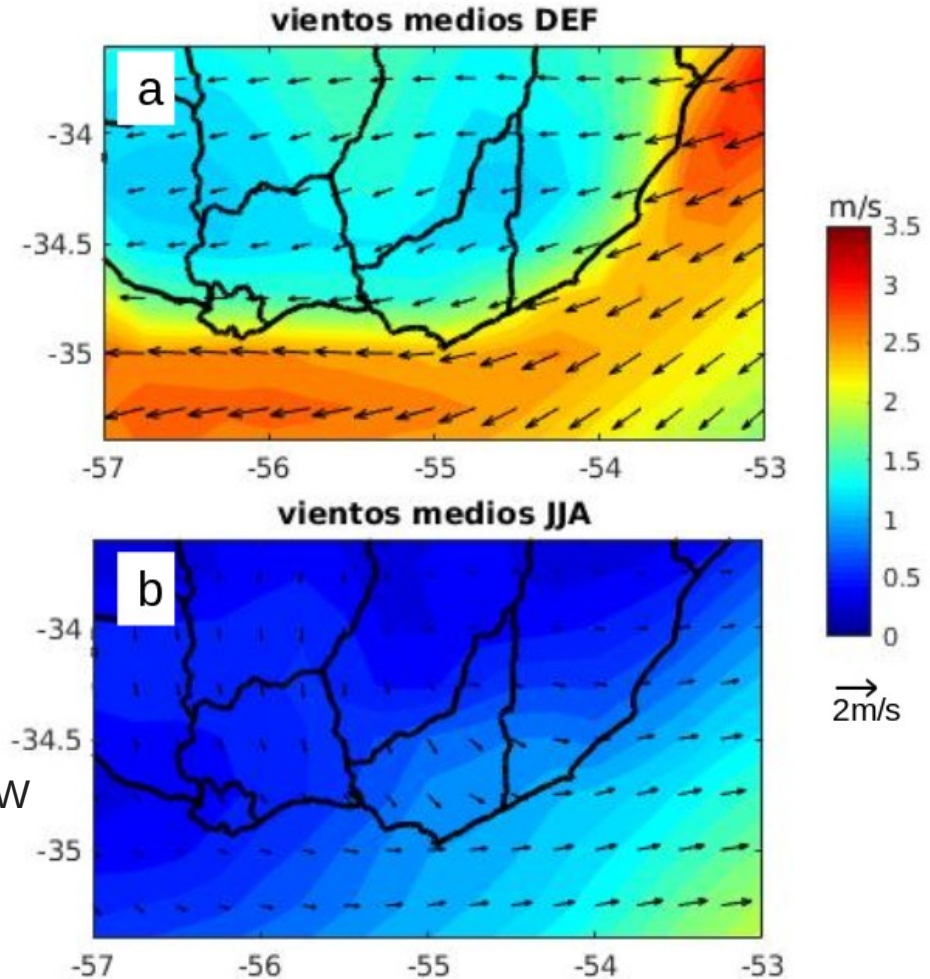
Principal factor controlador de la circulación

La circulación y variabilidad del estuario del RdP se encuentran moduladas principalmente por vientos.

A nivel estacional

Verano: Del sector NNE
más intensos

Invierno: Del sector S-SW



VIENTOS

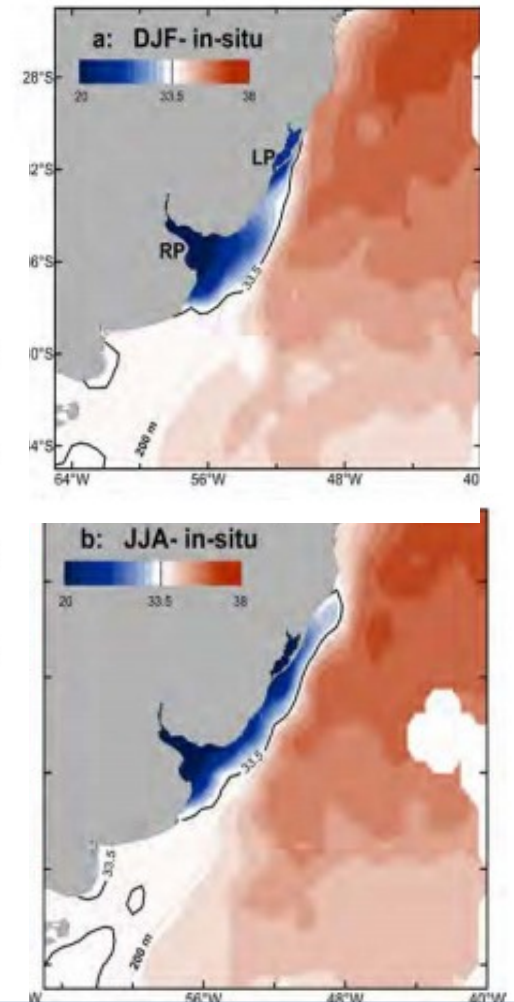
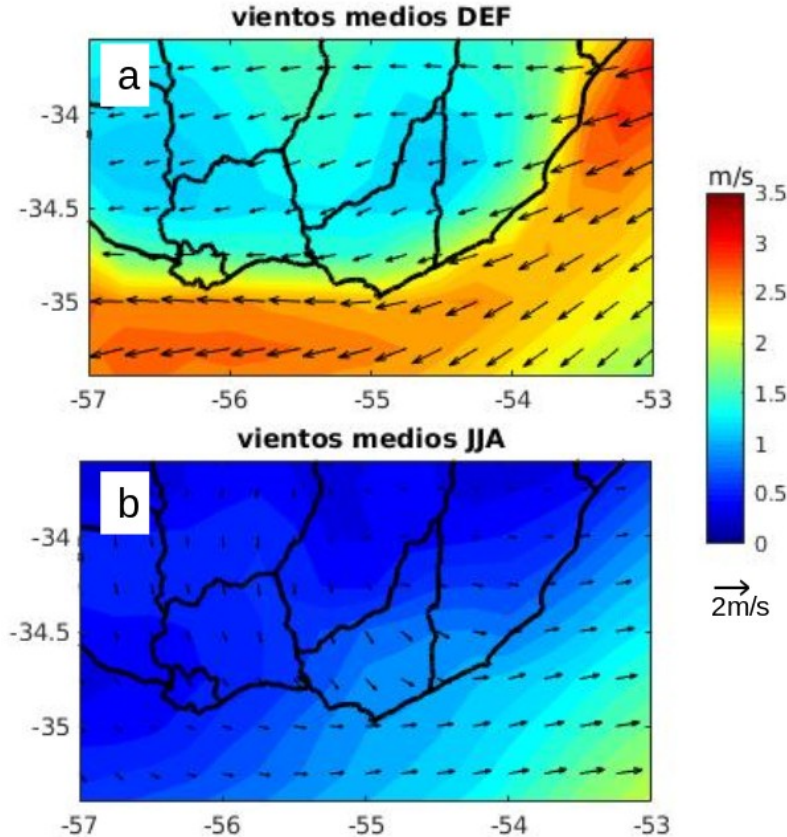
Principal factor controlador de la circulación

Verano

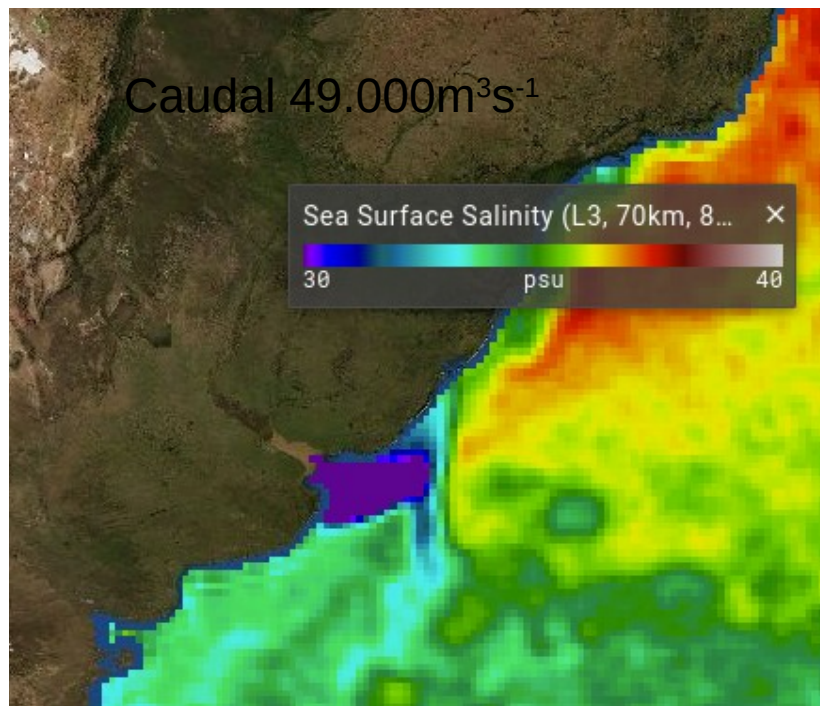
Vientos NNE + Coriolis = Flujo hacia Argentina
Surgencia de aguas oceánicas sobre la costa uruguaya

Invierno

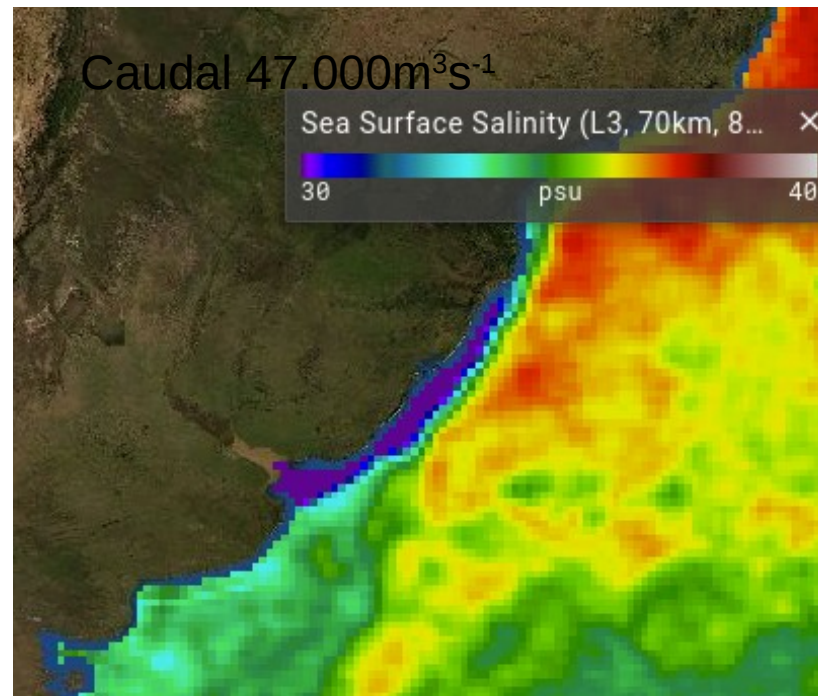
Menor influencia de vientos + Coriolis
= Flujo NNE sobre la costa.



El Niño

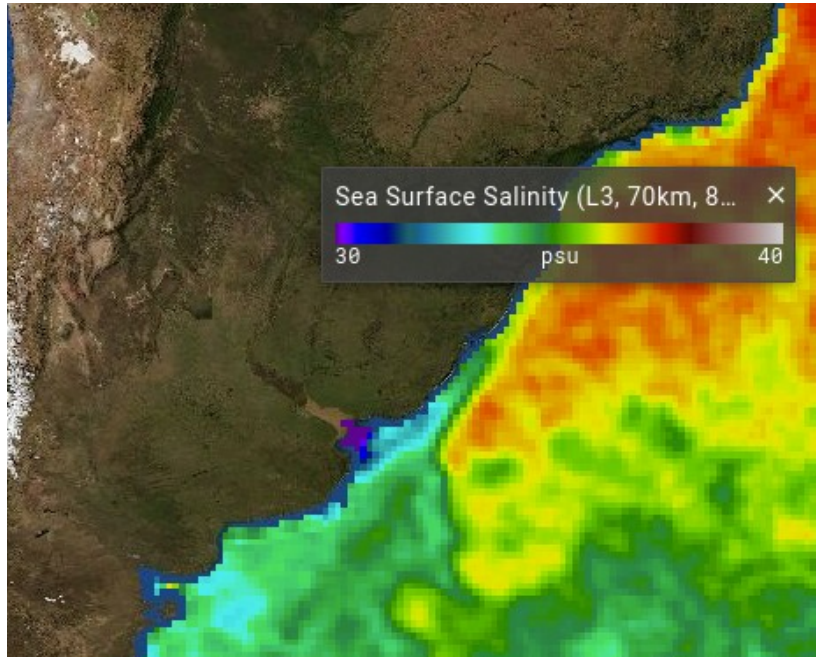


SMAP/REMSS 17/02/2016

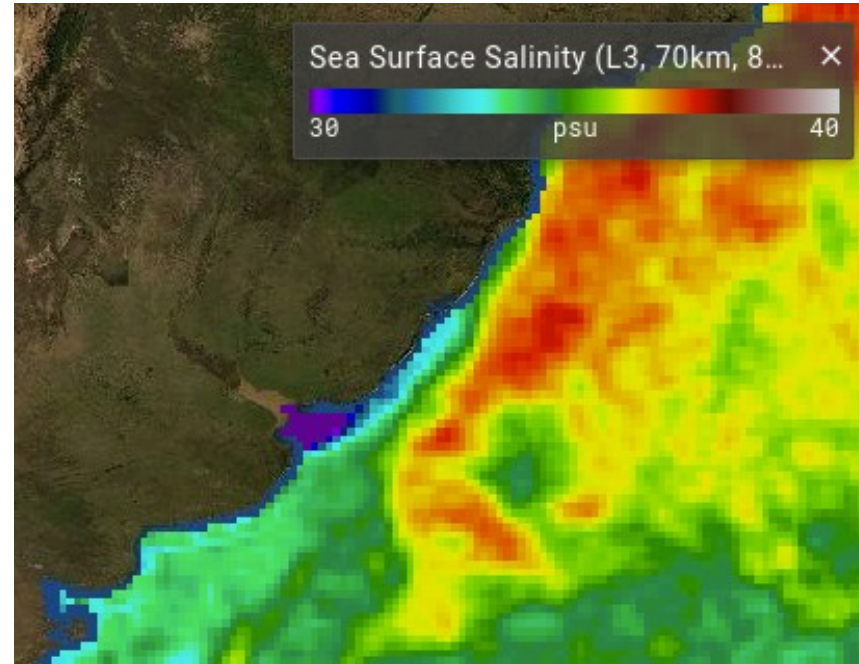


SMAP/REMSS 17/05/2016

La Niña



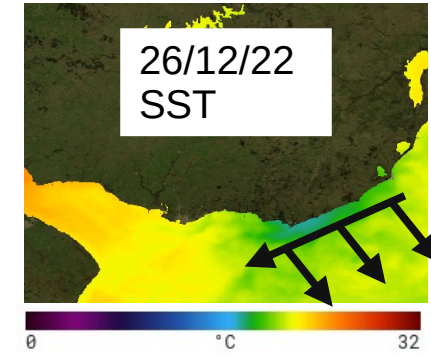
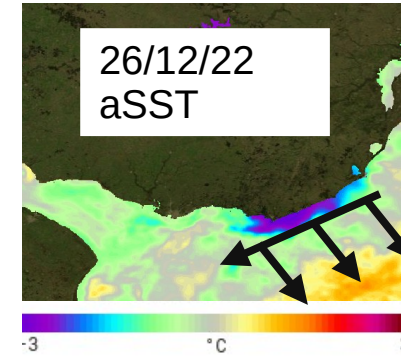
SMAP/REMSS 17/02/2022



SMAP/REMSS 17/05/2022

Surgencias costeras durante el verano

- Asociadas a Vientos del ENE
- Implican movimientos ascendentes de agua hacia superficie



Mecanismo

- Vientos paralelos a la costa + rotación terrestre
- Transporte Ekman *offshore* del agua superficial
- Agua de profundidad más fría alcanza la superficie
- Pueden ser identificadas con un enfriamiento del agua superficial

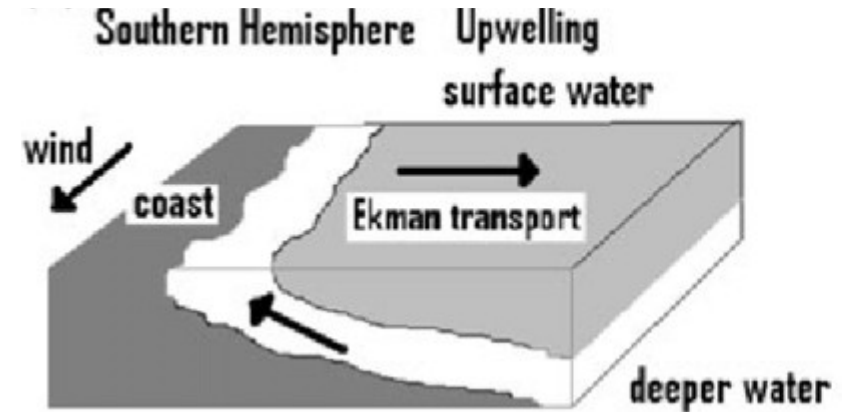
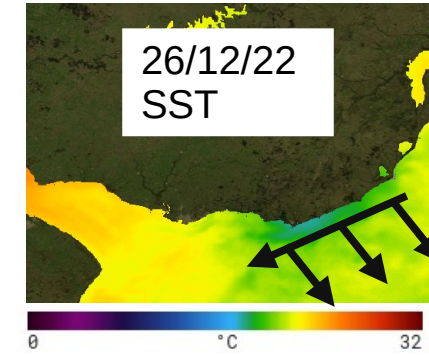
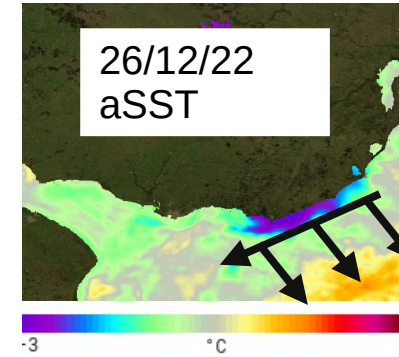
Surgencias costeras durante el verano

Mecanismo

- Vientos paralelos a la costa + rotación terrestre
- Transporte Ekman *offshore* del agua superficial
- Agua de profundidad más fría alcanza la superficie

$$U_E = \int_{-\infty}^0 u_E(z) dz = \frac{1}{\rho_0 f} \tau_y$$

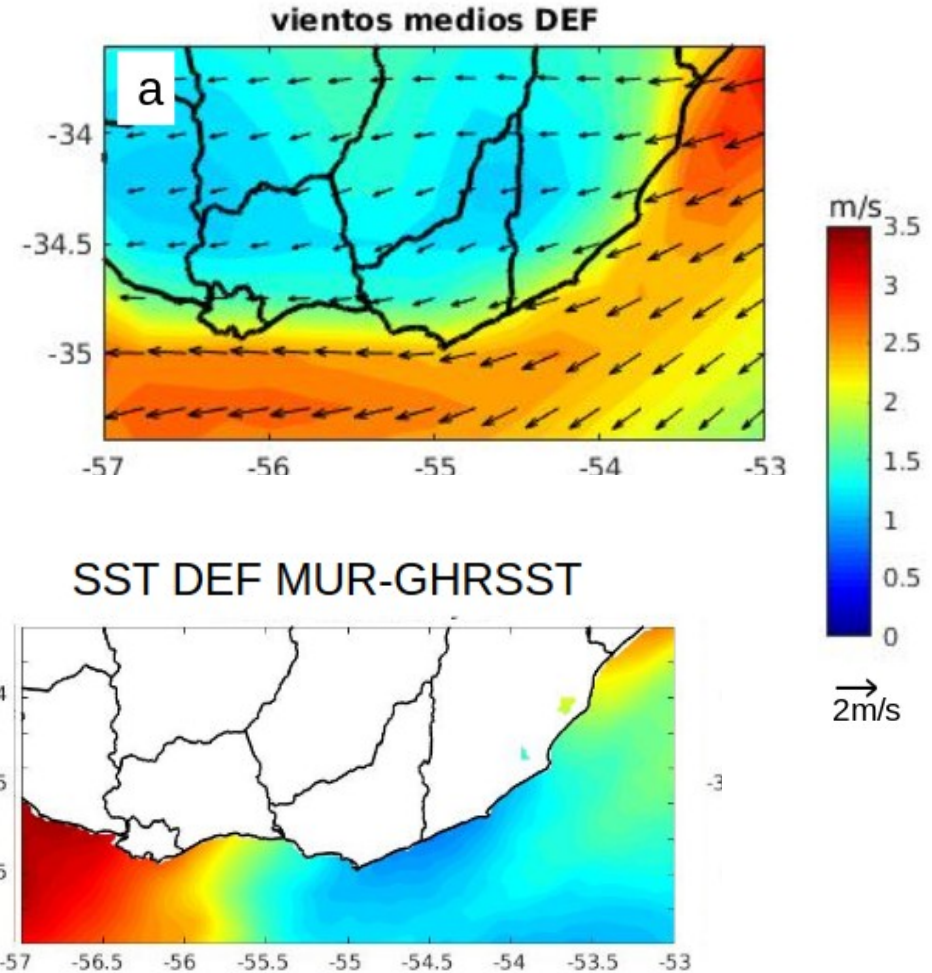
$$V_E = \int_{-\infty}^0 v_E(z) dz = \frac{-1}{\rho_0 f} \tau_x$$



Surgencias costeras durante el verano

A nivel climatológico → Verano: Del sector NNE más intensos

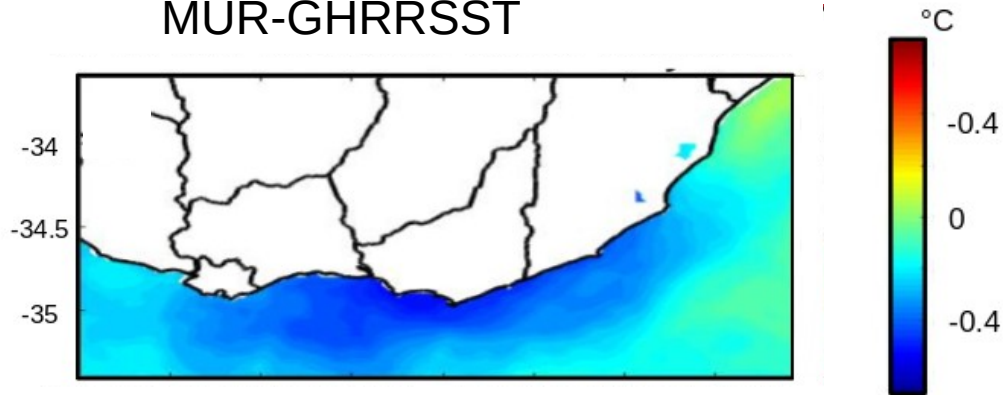
La costa Oceánica uruguaya presenta surgencia climatológica durante el verano relacionadas al viento y orientación de la costa.



Surgencias costeras durante el verano

● Variabilidad interanual

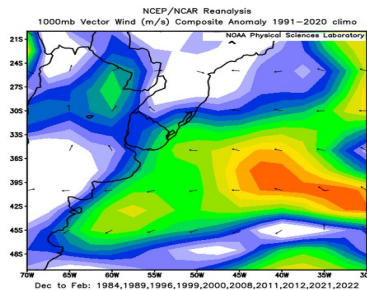
MUR-GHRRSST



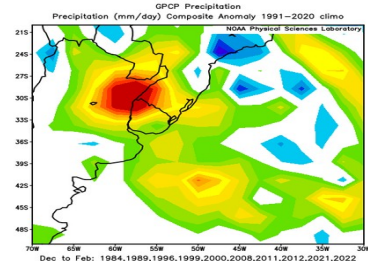
● SST DEF Niña - SST DEF

Surgencia climatológica más intensa durante La Niña

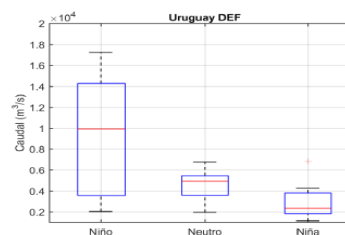
● La Niña induce
Vientos del E anómalos
Menores descargas



Anom vientos del E



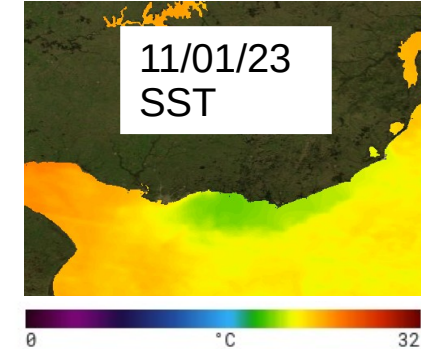
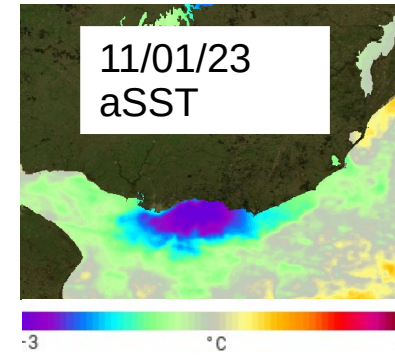
Menores precipitaciones → Menor descarga RdP



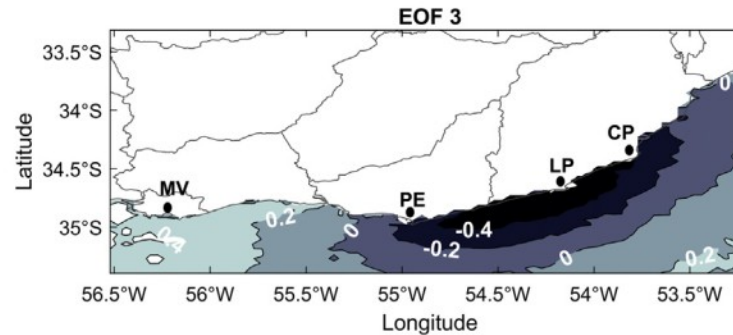
Surgencias costeras durante el verano

● Eventos de surgencia intensa

Estudio sistemático de estructura espacial y características de las surgencias aSST satelital



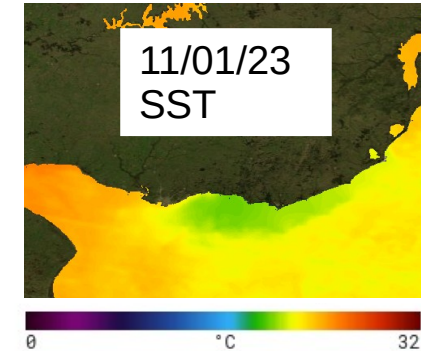
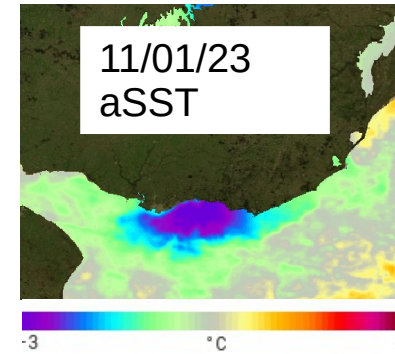
Región oceánica entre PdE y CP



Surgencias costeras durante el verano

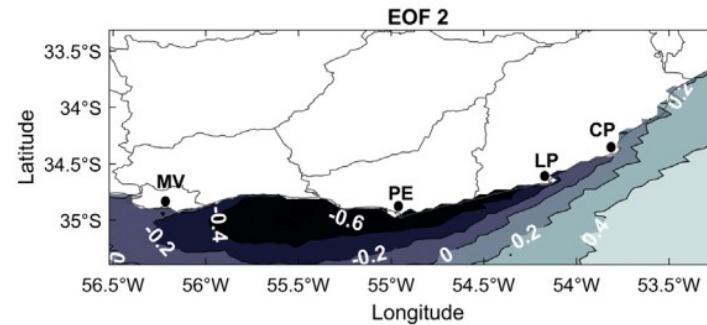
● Eventos de surgencia intensa

Estudio sistemático de estructura espacial y características de las surgencias aSST satelital



Región oceánica entre PdE y CP

Región estuarina entre Mvd y PdE



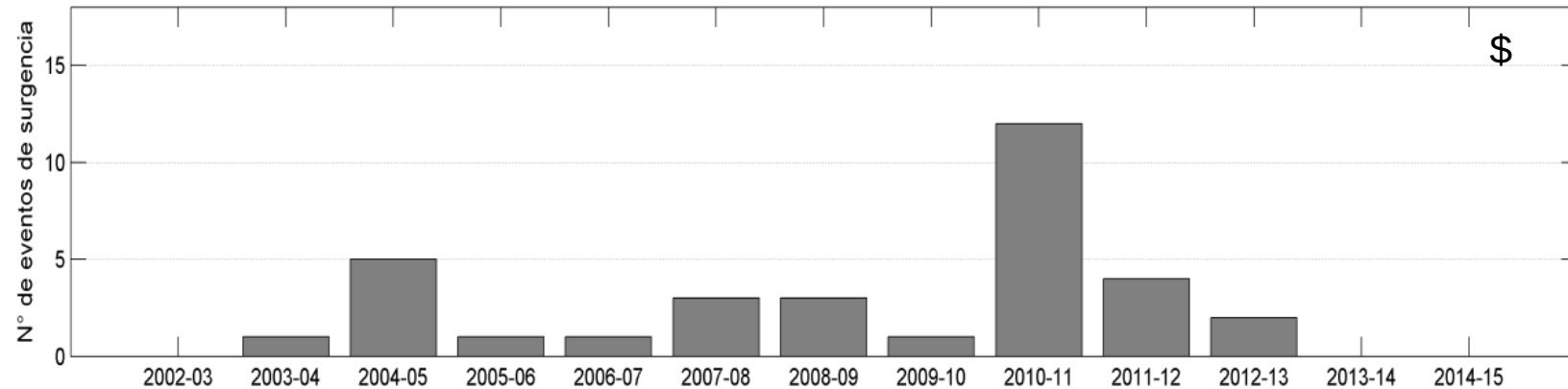
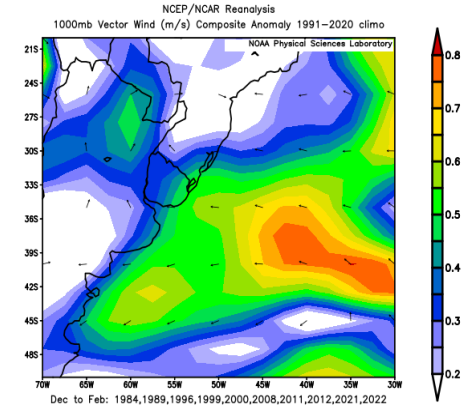
Surgencias costeras durante el verano

Eventos de surgencia intensa

A escala interanual

La variabilidad en los patrones de vientos se encuentra relacionada con ENOS,

Durante las fases frías (La Niña) se observa durante el verano vientos anómalos del sector E paralelos a la costa.



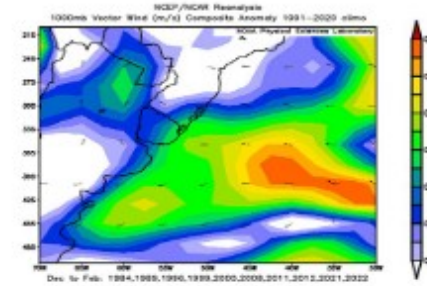
Trinchin et al., 2019

Surgencias costeras durante el verano

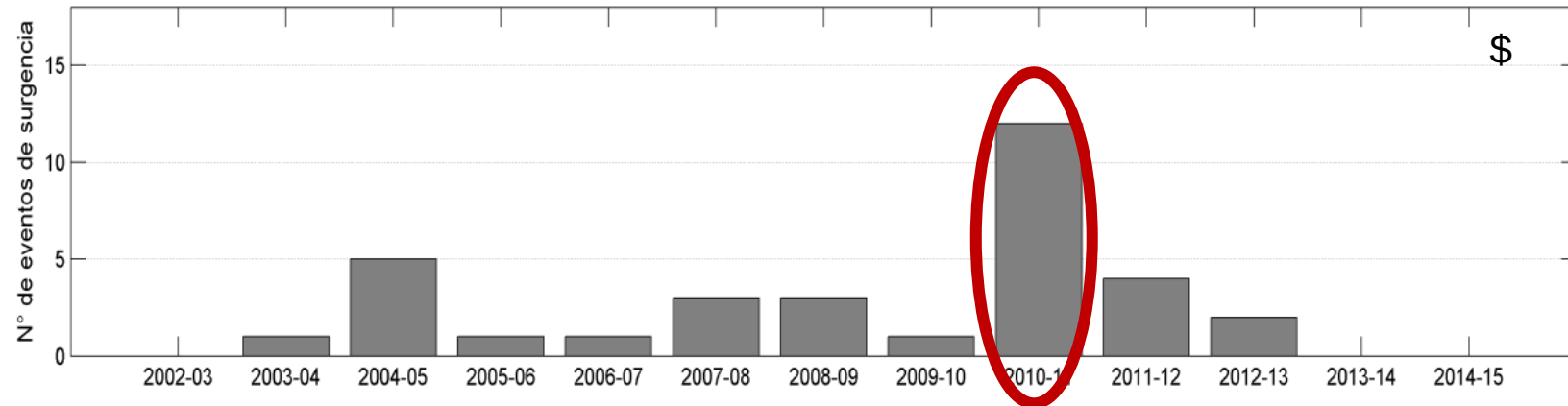
Eventos de surgencia intensa

La variabilidad en los patrones de vientos se encuentra relacionada con las fases cálidas y frías de ENOS,

Durante las fases frías (La Niña) se observa durante el verano vientos anómalos del sector E paralelos a la costa.



Anom vientos del E



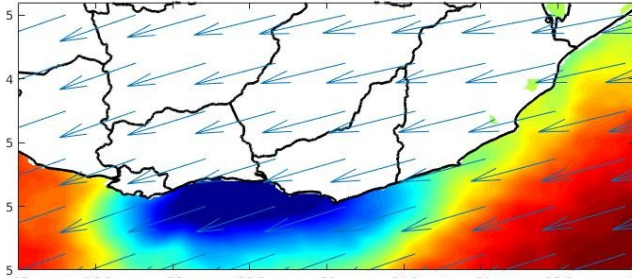
Evento Niña intenso

Trinchin et al., 2019

Surgencias costeras durante el verano

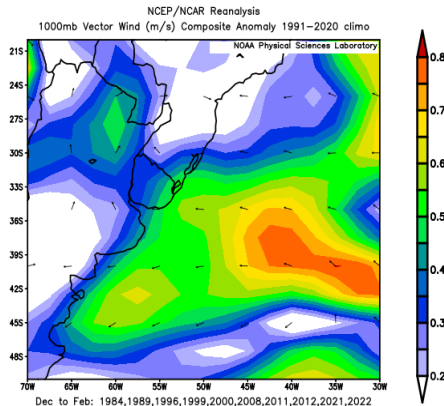
Eventos de surgencia intensa

aSST GH NIÑA

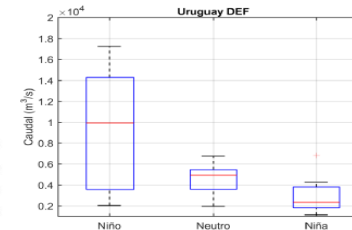
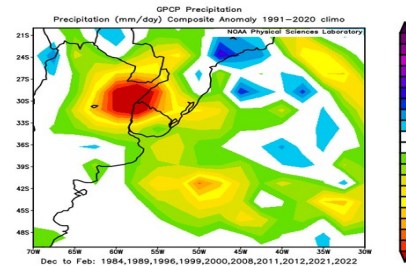


La mayoría de los días de surgencia intensa ocurren durante la Niña y son más intensos.

- Vientos anómalos paralelos a la costa
- Menor descarga de agua dulce



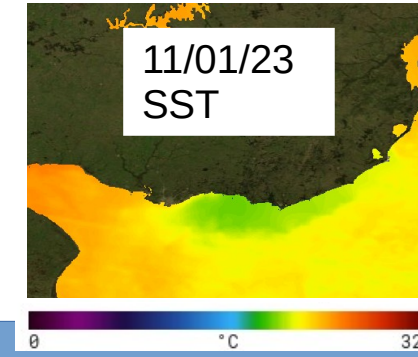
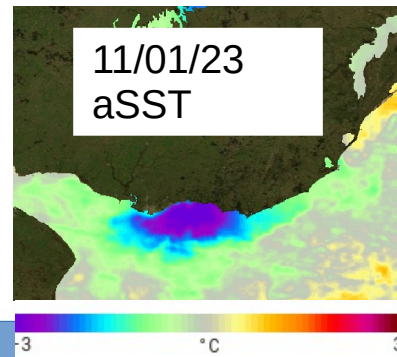
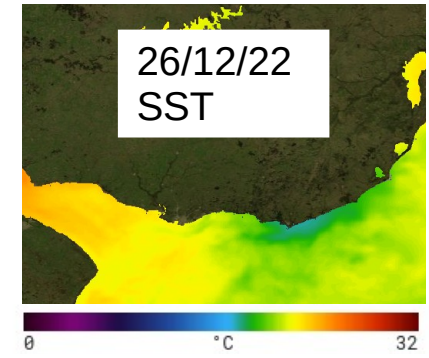
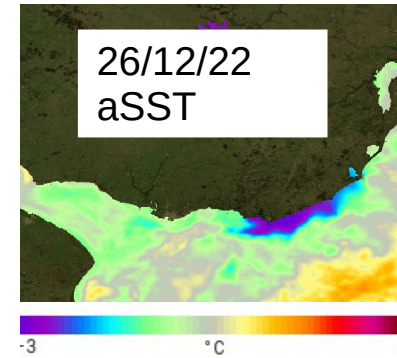
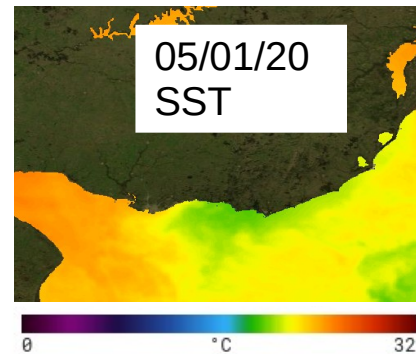
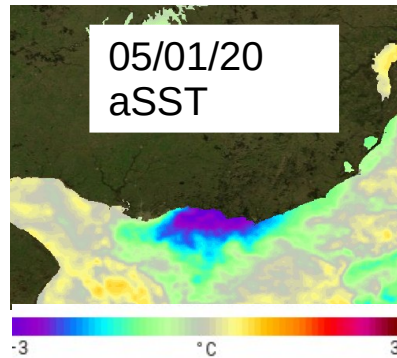
Vientos anómalos del E



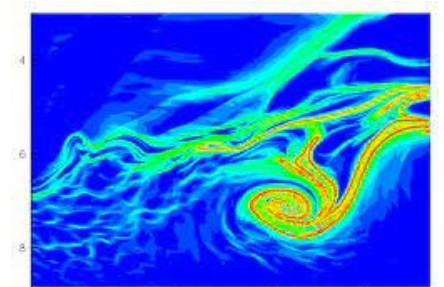
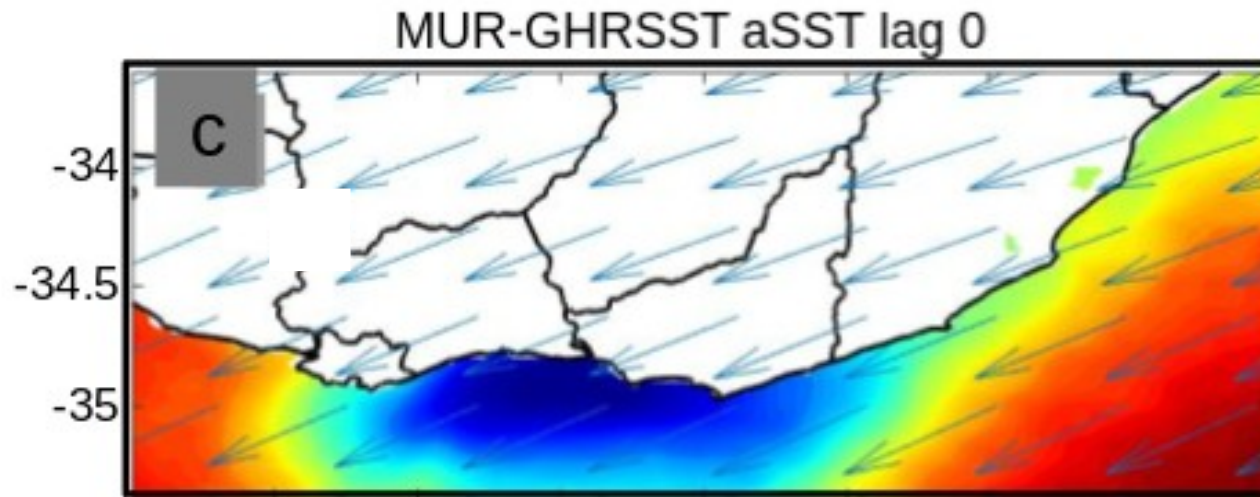
Menores precipitaciones → Menor descarga RdP

Surgencias costeras asociadas el viento

En la costa uruguaya asociados a vientos del sector N-NE y favorecidos por bajas descargas del RdP ocurren procesos de surgencia.



- Asociados a las surgencias se generan frentes en superficie.
- Organismos y material en suspensión pueden quedar retenidos o ser transportados durante la evolución de los frentes, con implicancias a distintos niveles ecológicos.



Implicancias??

Retención

Transporte

PROCESOS COSTEROS

BRISA MARINA

Ciclo diario de vientos en la costa generado por el calentamiento diferencial agua - tierra

Su estudio es importante para

- Generación de energía eólica
- Turismo
- navegación
- Desarrollo urbano



BRISA MARINA

Ciclo diario de vientos en la costa generado por el calentamiento diferencial del agua - tierra

Durante el día:

La TSM no se eleva tanto como la de la tierra debido a la mayor capacidad calórica del agua.

Se genera una celda de circulación que en superficie tiene dirección hacia la tierra

- Aparece al final de la mañana, alcanzando su máxima intensidad al comienzo de la tarde.
- Se observa la formación de cúmulus sobre tierra y la desaparición de ellos sobre el mar.



BRISA MARINA

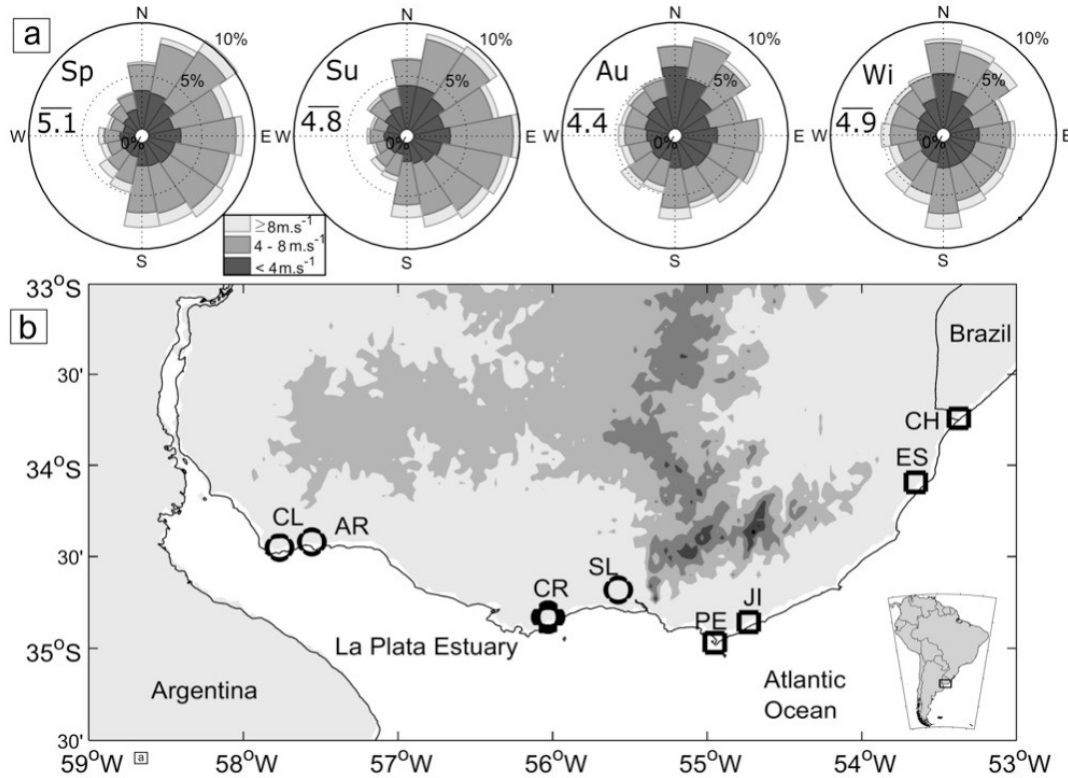
Ciclo diario de vientos en la costa generado por el calentamiento diferencial del agua - tierra

Durante la noche:

Se produce un enfriamiento radiativo más intenso sobre el continente, desarrollándose una circulación en sentido inverso (brisa terrestre).



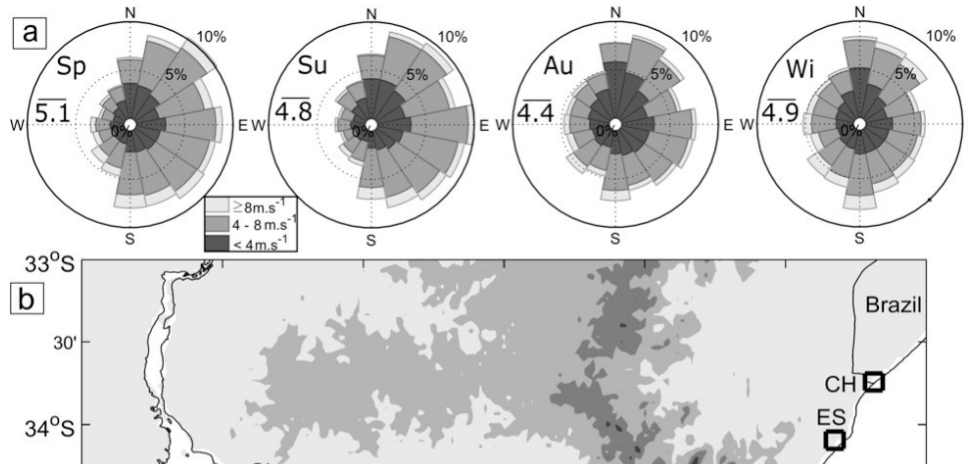
BRISA MARINA EN URUGUAY



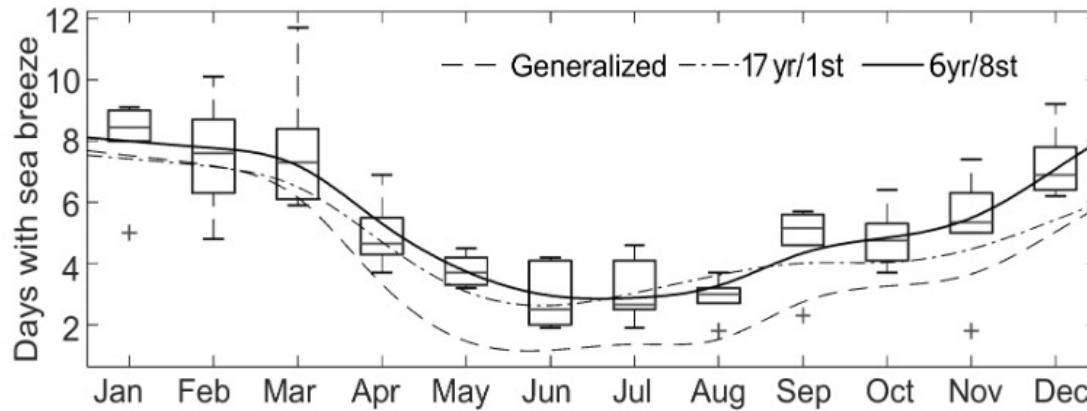
- Vientos del NE prevalecen la mayor parte del año, particularmente durante el verano.
- Vientos del SW son igualmente importantes durante el invierno (Migración al N del Anticiclón semipermanente del Atlántico)

Los índices de brisa detectan una rápida variación en la velocidad y dirección del viento.

BRISA MARINA EN URUGUAY

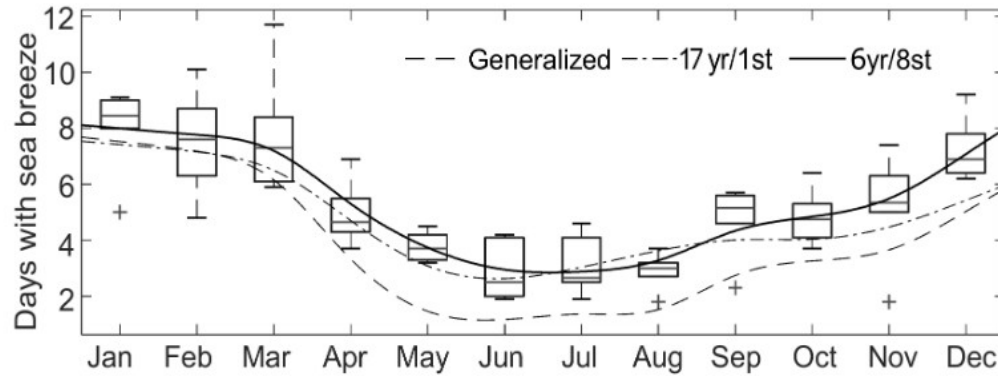


Los índices de brisa detectan una rápida variación en la velocidad y dirección del viento.



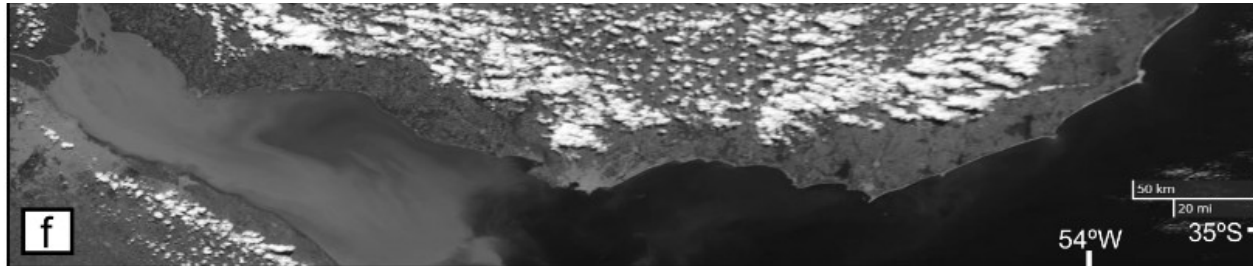
● Más frecuentes durante el verano

BRISA MARINA EN URUGUAY



● 4°C dif de T

● Veloc hasta 7.1 ms⁻¹



Manta et al., 2020

BRISA MARINA EN URUGUAY

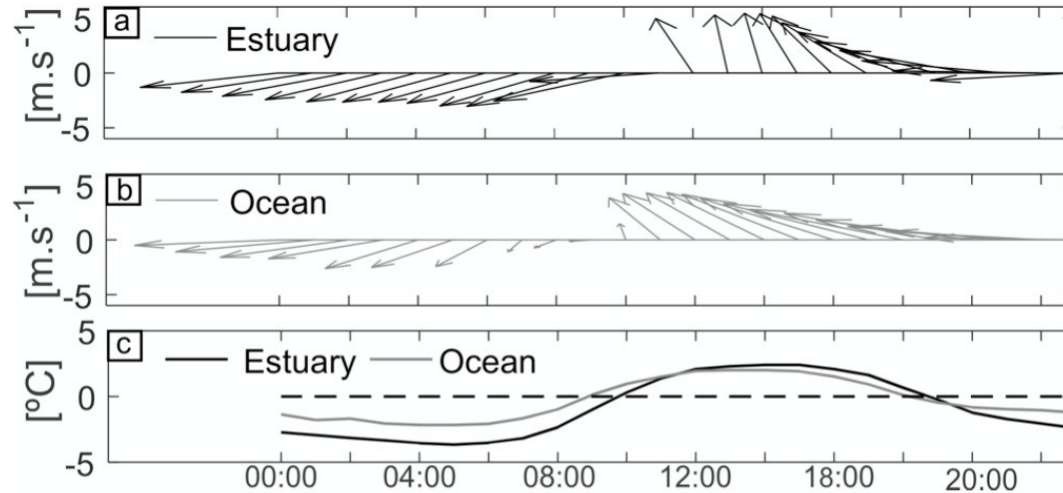
DIFERENCIAS ESTUARIO OCÉANO
durante el verano

Figure 4: Daily cycle of winds [m.s^{-1}] during summer in: a) Estuary and b) Ocean. c) Difference between air and water temperature [ΔT , $^{\circ}\text{C}$] in the estuary and oceanic region during summer, respectively. Wind data and air temperature from all estuarine and oceanic stations were used to compute each panel respectively. For the SST, representative time series for each region was taken (see methods).



ΔT en Océano y Estuario son distintos (el estuario en gral está a mayor T) los contrastes son distintos generando diferencias en las características de la brisa en ambas regiones

La orientación de la costa en relación a los vientos prevalentes también juega un rol

BRISA MARINA EN URUGUAY

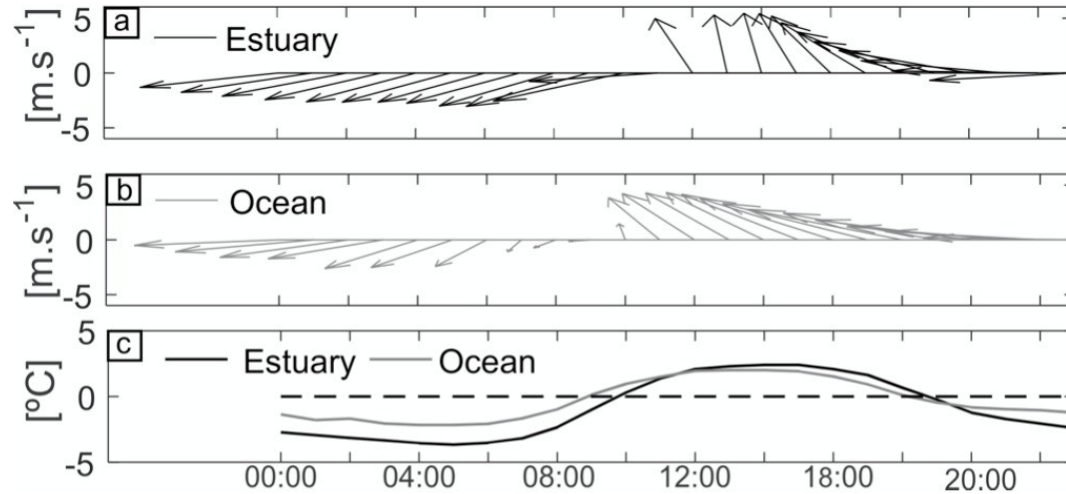
DIFERENCIAS ESTUARIO OCÉANO
durante el verano

Figure 4: Daily cycle of winds [m.s^{-1}] during summer in: a) Estuary and b) Ocean. c) Difference between air and water temperature [ΔT , $^{\circ}\text{C}$] in the estuary and oceanic region during summer, respectively. Wind data and air temperature from all estuarine and oceanic stations were used to compute each panel respectively. For the SST, representative time series for each region was taken (see methods).



Región Oceánica:
Comienza a las 11:00 ($\Delta T > 0$
más temprano)

Los vientos deben “rotar”
menos

BRISA MARINA EN URUGUAY

DIFERENCIAS ESTUARIO OCÉANO durante el verano

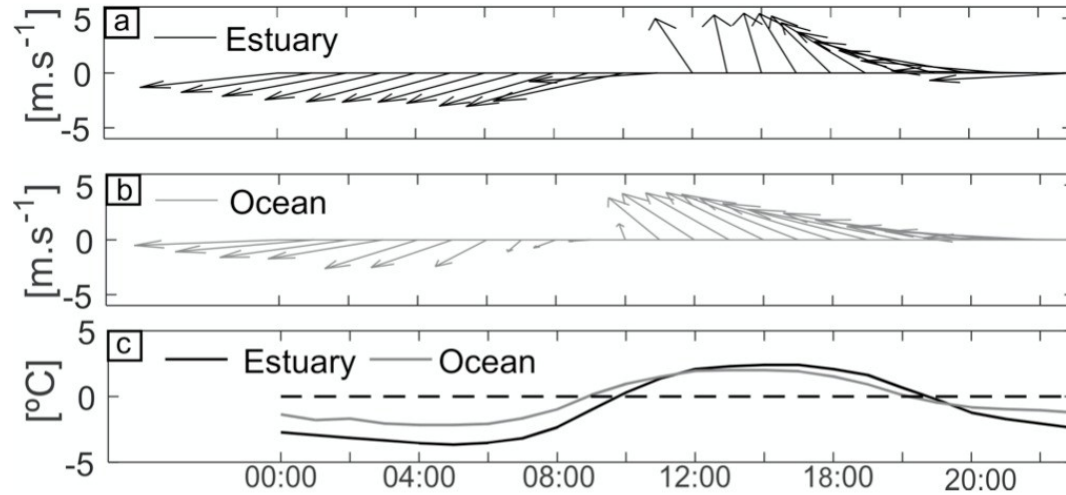


Figure 4: Daily cycle of winds [m.s^{-1}] during summer in: a) Estuary and b) Ocean. c) Difference between air and water temperature [ΔT , $^{\circ}\text{C}$] in the estuary and oceanic region during summer, respectively. Wind data and air temperature from all estuarine and oceanic stations were used to compute each panel respectively. For the SST, representative time series for each region was taken (see methods).



Región Estuarina:
Comienza a las 12:00

BRISA MARINA EN URUGUAY

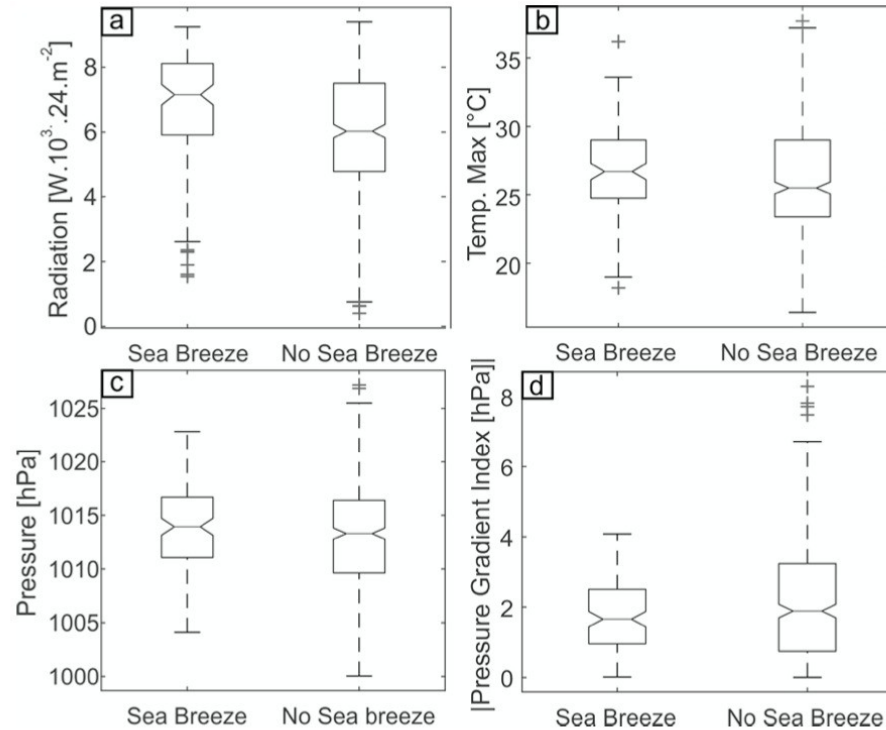


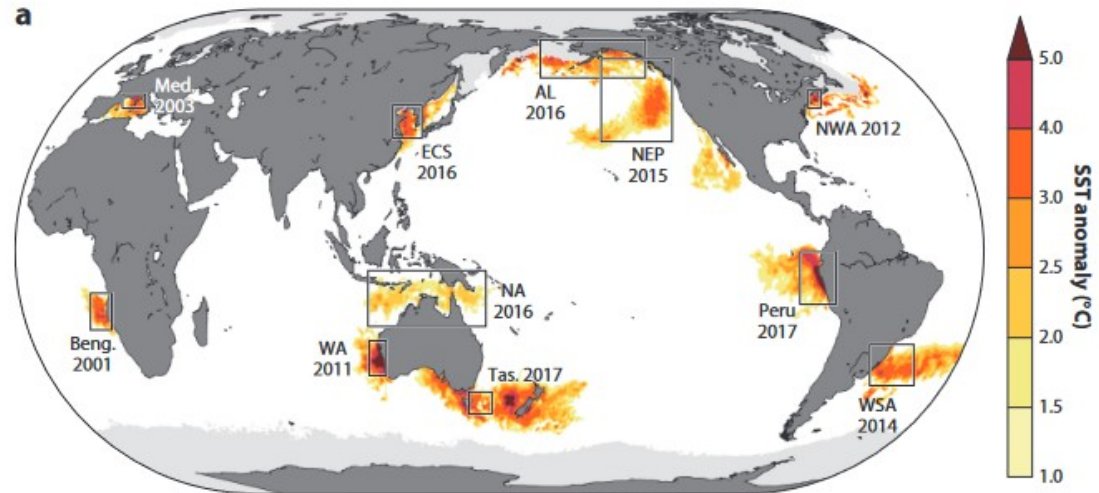
Figure 6: Box plot derived from Kruskal-Wallis test for summer days between 2011 and 2016 ($n = 728$) in Uruguay with or without sea breeze for: a) Daily cumulative in situ radiation ($p < 0,05$), b) Daily maximum temperature ($p < 0,1$). c) Pressure in CR ($p < 0,1$), d) Pressure Gradient Index ($PGI = SLP_{ocean36\tilde{z}S,53\tilde{z}W} - SLP_{land33\tilde{z}S,56\tilde{z}W}$; $p < 0,05$). Box limits extend to the median, 25th and 75th percentile. Whiskers extend to almost all data range, except for sum symbols automatically considered as outliers.

- Viento sinóptico débil
- Cielo despejado
- Alivia T máximas

Olas de calor marinas

Eventos climáticos extremos que ocurren en los océanos

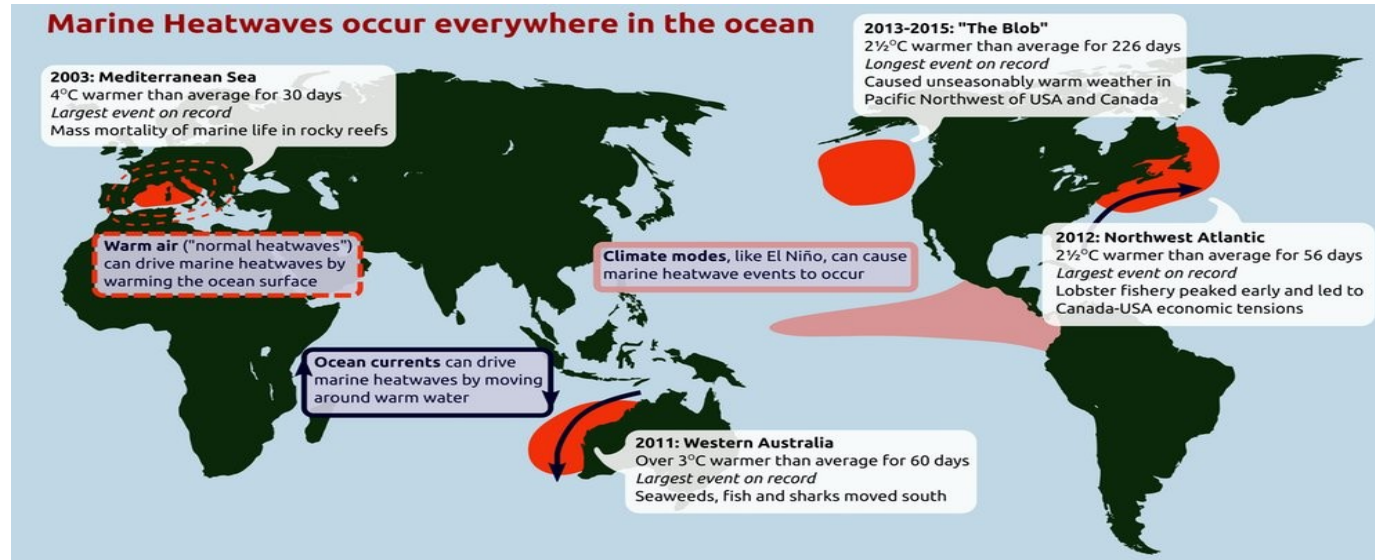
Generan impactos sobre los ecosistemas con consecuencias socioeconómicas (e.j. mortandades masivas, floraciones)



Olas de calor marinas

Son eventos con al menos 5 días consecutivos de temperaturas cálidas por encima del percentil 90th basado en un período de 30 años.

(Hobday et al., 2016)



- ❑ Reportadas en todos los océanos, son cada vez más frecuentes y duraderas
- ❑ Mecanismos de generación: flujos de calor, estratificación, advección, teleconexiones

Olas de calor marinas en el ASO

Siguiendo metodología de Hobday et. al (2016) se calcularon las MHW a la serie de SST promediada en un área con similar dinámica

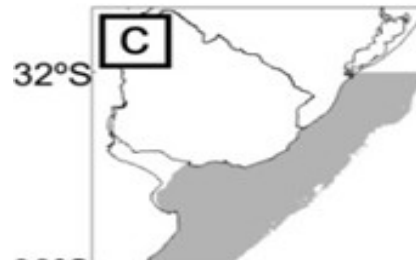


75 MHW en 30 años (1988-2017)

Total de 893 días con
MHW

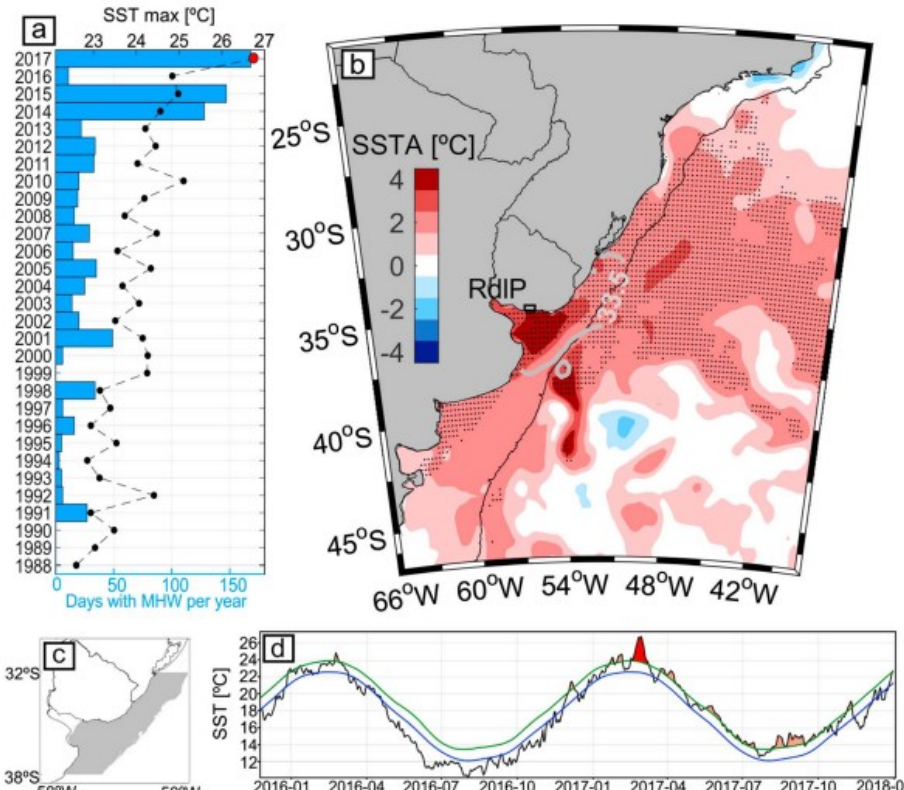
2017 año con más
cantidad de días 168

Tendencia creciente
en duración e
intensidad



Olas de calor marinas en el ASO

- ❑ Evento extremo (categoría 4)
- ❑ Duración: 22 días
- ❑ Fue el más intenso en términos de:
 - Anomalía: 4.26 °C
 - SST absoluta: 26.8 °C
 - 1.7 y 1.5 °C más que el segundo y tercer máximo histórico de 2010 y 2015 respectivamente

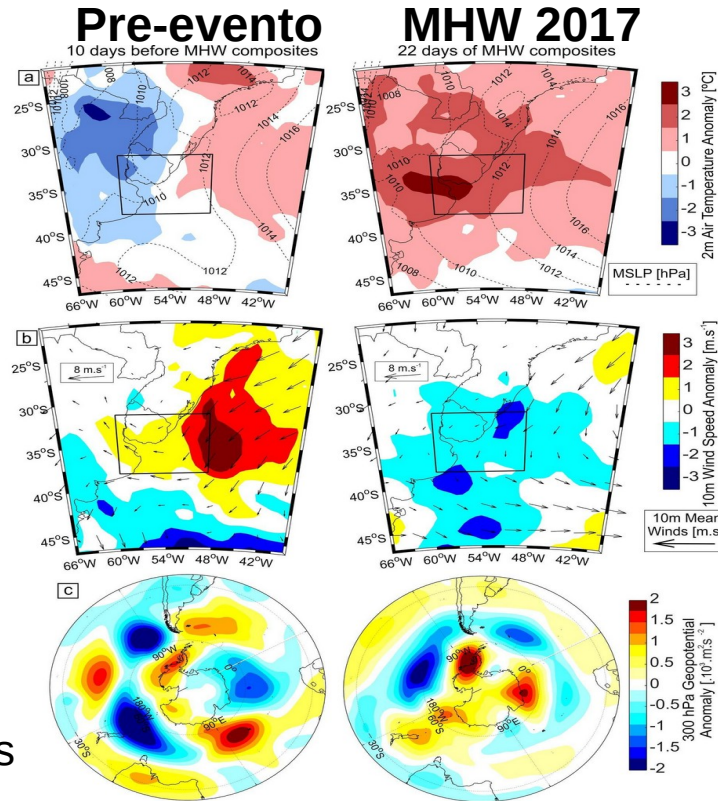


Olas de calor marinas en el ASO

P favorece viento N

Anomalía positiva de Viento NE (aire cálido)

de onda 3, propagación lenta
Asociado a persistencia de condiciones sinópticas previas
→ Consistente con teleconexión atmosférica de MJO durante fases 6 a 8 (MJO intensa)

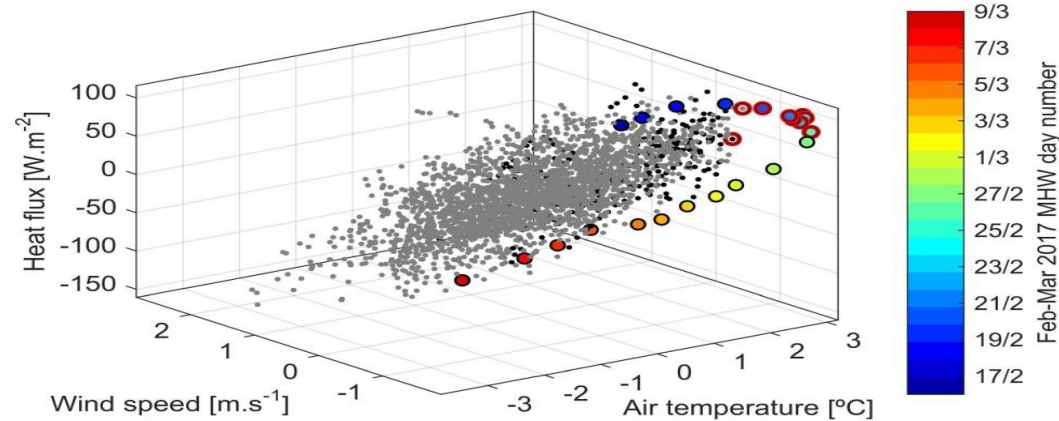


Favorece intercambio de flujos de calor

En altura bloqueo omega
Consistente con teleconexión de MJO fases 2-3, anom + de geo pot sobre Uruguay que debilita jet en lat subtropicales

Olas de calor marinas en el ASO

Condiciones que favorecieron la ocurrencia de este evento



Posibilidad de evaluar predictabilidad relacionada a MJO

PROCESOS COSTEROS

Combinación singular de persistencia de anomalía Taire



Anomalías de flujo de calor sobre percentil 95th y anom negativas de viento por debajo del percentil 5th



Intenso loop de calentamiento y estratificación difícil de romper por viento débil

Toneladas de peces muertos y algas tóxicas fueron reportados en la costa de Montevideo en 2017. Simil a 2015 (Méndez et al., 2015)



INFORME

Dinara estima que muerte de peces pudo haber sido por falta de oxígeno

Playas se llenan de peces muertos desde la Ciudad Vieja hasta Costa de Oro

Toneladas de lachas muertas cubrieron ayer las costas de Montevideo y Canelones. El fenómeno muchas veces ocurre por contaminación o por un cambio de salinidad del agua, pero ambas posibilidades parecerían quedar descartadas de acuerdo a las primeras observaciones realizadas por la Intendencia de Montevideo y la Dirección Nacional de Recursos Acuáticos (Dinara).

EL PAIS



EL OBSERVADOR

INGRESAR

NACIONAL > MONTEVIDEO

Todas las playas de Montevideo están inhabilitadas por presencia de cianobacterias

Se prevé que la situación se mantenga durante todo el fin de semana



Esfuerzo coordinado para monitorear y entender la interacción de este proceso físico con la componente biológica del sistema