



APROXIMACIÓN NUMÉRICA Y LAGRANGIANA APLICADA AL ESTUDIO DE PROCESOS COSTEROS EN URUGUAY

TESIS DOCTORADO EN GEOCIENCIAS

**Universidad de la República (UdelaR), Facultad de Ciencias,
Departamento de Ciencias de la Atmósfera y Física de los Océanos.**

Estudiante: M.Sc. Camila de Mello

Orientadores: Dr. Marcelo Barreiro (Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Departamento de Ciencias de la Atmósfera y Física de los Océanos), Dr. Emilio Hernández-García (Instituto de Física Interdisciplinar y Sistemas Complejos, IFISC (CSIC-UIB), Campus Universitat de les Illes Balears, Palma de Mallorca, España) y Dr. Leonardo Ortega (Dirección Nacional de Recursos Acuáticos)

Comité de seguimiento: Dra. Leticia Burone y Dra. Cecilia Cabeza

Esta tesis va dedicada a mi hijo Diego, el gran motor.

AGRADECIMIENTOS

Este fue un ciclo particular que se cierra con la entrega de esta tesis. Hay mucha gente que me ha ayudado y a la cual quisiera agradecer.

Principalmente y sobre todo quiero agradecer a mi orientador Marcelo. No tengo más que palabras de agradecimiento, gracias por tu infinita paciencia, dedicación y ayuda durante todo este tiempo. Muchas gracias por abrirme las puertas e incluirme en el Departamento de Ciencias de la Atmósfera y Física de los Océanos. Y también muchas gracias por transmitir de manera tan interesante, sencilla y clara conceptos tan complejos, logrando transmitir las ganas de trabajar en estos temas.

Agradezco también a mis co-orientadores por sus aportes, así como a los integrantes del tribunal por formar parte del mismo, al programa de Doctorado PEDECIBA-Geociencias y la CAP por su ayuda financiera.

A Romina y a Gaston, gracias por incluirme y hacerme sentir una más en el grupo de oceanógrafos del DCAFO desde el primer día. A Yilian y también a Iago por la buena onda en la oficina; y a Alain por la gran ayuda informática.

A mis amigas y amigos de la vida, gracias por estar. A Sil, tus charlas y escuchas hicieron la diferencia a tiempo, cada vez. No alcanzan palabras para agradecerte. Muchas gracias!

A mi madre y a mi padre, gracias por estar.

Finalmente, no puedo dejar de agradecer a las personas que me ayudaron a empezar a posicionarme de otra manera y cerrar el ciclo. Sin dudas sin ellas no estaría entregando esta tesis. Gracias a Ana por ayudarme a asumir. Y a María y colegas. Su ayuda generó un espacio de paz e hizo la diferencia para alcanzar la tranquilidad que necesitaba durante este último tiempo.

TABLA DE CONTENIDOS

| | |
|--|------------|
| RESUMEN | VII |
| PALABRAS CLAVE | IX |
| LISTA DE FIGURAS | X |
| LISTA DE TABLAS | XV |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 Introducción general | 1 |
| 1.2 Atlántico Suroccidental | 4 |
| 1.3 Región costera uruguaya y área marina adyacente | 7 |
| 1.4 Justificación del trabajo | 12 |
| 2. HIPÓTESIS DE TRABAJO Y OBJETIVOS | 15 |
| 2.1 Hipótesis de trabajo | 15 |
| 2.2 Objetivos | 15 |
| 2.2.1 Objetivo general | 14 |
| 2.2.2 Objetivos particulares | 14 |
| 3. APROXIMACIÓN METODOLÓGICA GENERAL | 17 |
| 3.1 Aproximación numérica | 17 |
| 3.2 Aproximación Lagrangiana | 21 |
| 3.2.1 Exponentes de Lyapunov | 21 |
| 3.2.2 Modelo de seguimiento de partículas | 24 |
| 4. SURGENCIAS A LO LARGO DE LA COSTA URUGUAYA: ESTRUCTURA VARIABILIDAD Y FACTORES CONTROLADORES | 26 |
| 4.1. Introducción y objetivos del capítulo | 26 |
| 4.2 Modelo numérico: configuración y experimentos | 28 |
| 4.3 Validación del modelo: Campos medios y variabilidad | 31 |
| 4.4 Identificación de surgencias intensas observadas | 37 |
| 4.5 Estructura de las surgencias | 40 |
| 4.5.1 Campos superficiales | 40 |
| 4.5.2 Estructura vertical | 44 |
| 4.6 Rol de la variabilidad de viento y descarga continental sobre el desarrollo de surgencias intensas | 49 |
| 4.7 Comentarios finales y conclusiones | 53 |

| | |
|--|-----------|
| 5. APROXIMACIÓN LAGRANGIANA AL ESTUDIO DE LAS SURGENCIAS DE VERANO SOBRE LA COSTA URUGUAYA | 56 |
| 5.1 Introducción al capítulo y objetivos | 56 |
| 5.2 Modelo numérico | 57 |
| 5.2.1 Configuración del modelo | 57 |
| 5.2.2 Identificación de las fechas de surgencia intensa simuladas | 60 |
| 5.3 Aproximación Lagrangiana | 63 |
| 5.3.1. Técnica de FSLE aplicada | 63 |
| 5.3.2 Dispersión de partículas Lagrangianas - ICHTHYOP | 65 |
| 5.4 Resultados Lagrangianos | 66 |
| 5.4.1 Experimentos de sensibilidad | 67 |
| 5.4.2 Caracterización media de la mezcla horizontal | 68 |
| 5.4.3 Patrones de LCS durante eventos de surgencia intensa | 70 |
| 5.4.4 Evolución de LCS y comparación con transporte de partículas | 75 |
| 5.5 Comentarios finales y conclusiones | 79 |
| 6. RELACIÓN ENTRE FRENTES DE CONVERGENCIA Y LOCALIZACIÓN DE LA FLOTA INDUSTRIAL COSTERA DURANTE UN EVENTO DE SURGENCIA EN URUGUAY | 82 |
| 6.1 Introducción y objetivos del Capítulo | 82 |
| 6.3 Posición de buques Categoría B durante operaciones pesqueras - VMS | 84 |
| 6.4 Eventos de surgencia intensa y su relación con la posición de la flota Categoría B | 85 |
| 6.5 Comentarios finales y conclusiones | 92 |
| 7. DISCUSIÓN GENERAL Y PERSPECTIVAS | 95 |

De la presente tesis se han desprendido los siguientes artículos que se detallan a continuación:

- de Mello, C., Barreiro, M., Ortega, L., Trinchin, R., & Manta, G. (2022). Coastal upwelling along the Uruguayan coast: Structure, variability and drivers. *Journal of Marine Systems*, 230, 103735.
- de Mello, C., Barreiro, M., Hernández-García., E., Trinchin, R., & Manta, G. (2022). A Lagrangian study of summer upwelling along the Uruguayan coast. *Continental Shelf Research. Minor review/Accepted*.
- de Mello, C., Barreiro, M. ., Marin, Y., Ortega, L., Trinchin, R., & Manta, G. (2022). Relación entre frentes de convergencia y localización de la flota pesquera durante la ocurrencia de surgencia costera en Uruguay. *INNOTEC*, (24 jul-dic). <https://doi.org/10.26461/24.03>

RESUMEN

La presente tesis se enfoca en el estudio de las surgencias que ocurren durante el verano sobre la costa uruguaya, las cuales fueron analizadas mediante la aplicación conjunta de datos observacionales y la implementación del modelo numérico CROCO (con una resolución horizontal de $1/36^\circ$ y 40 niveles sigma en la vertical). El modelo fue forzado con vientos diarios provenientes del reanálisis NCEP-DOE y descargas diarias del Río de la Plata (RdP), junto con flujos de calor climatológicos. La comparación entre los resultados del modelo y las observaciones indica que el modelo reproduce adecuadamente la variabilidad diaria, estacional e interanual de la región, lo cual permitió su uso para evaluar el rol de vientos y de la descarga del RdP en el desarrollo de eventos de surgencia intensa. La identificación de las fechas de surgencia fue realizada mediante un análisis de máxima covarianza entre los vientos zonales diarios de NCEP-DOE y la temperatura superficial (SST) satelital. De esta forma, a partir de las simulaciones se caracterizó por primera vez en forma completa la estructura horizontal y vertical, así como la evolución de los procesos de surgencia intensa en la costa uruguaya. Adicionalmente, fueron realizadas simulaciones bajo distintos escenarios que permitieron evidenciar el rol principal del viento y el secundario de las descargas del RdP en el desarrollo de surgencias. También se encontró que durante La Niña se inducen anomalías de viento y descarga que favorecen el desarrollo de surgencias sobre la costa estuarina, mientras que durante El Niño ocurre lo opuesto.

A partir de los campos físicos simulados por el modelo numérico fueron estudiados los procesos de transporte horizontal y mezcla asociados a las surgencias costeras mediante la aplicación de una técnica Lagrangiana. En este sentido, se computaron los Exponentes de Lyapunov de Tamaño Finito (FSLE) a partir del campo de velocidad superficial simulado. Los procesos de turbulencia horizontal fueron estudiados durante eventos de surgencia intensa

a partir del análisis de promedios temporales de FSLE. Por su parte, el análisis de los máximos de FSLE permitió detectar Estructuras Coherentes Lagrangianas (LCS), proveyendo información acerca de la ubicación de regiones frontales de convergencia relacionadas con las surgencias, así como de los patrones de transporte asociados al flujo. Se encontró elevada actividad de mezcla en toda la zona costera, particularmente sobre la región estuarina durante las fechas en que se registraron eventos de surgencia intensa. Al enfocarse en los máximos de FSLE, las LCS se encontraron principalmente sobre la región estuarina localizando los frentes de convergencia. La ubicación de dichas estructuras se relacionó con los gradientes de SST simulados, así como con los máximos de distribución de Clorofila *a* satelital y máximos de turbidez, resaltando la importancia de la aproximación Lagrangiana en la identificación de frentes de retención con distintos orígenes. El análisis de la evolución de las LCS durante eventos particulares de surgencia, junto con la dispersión simulada de partículas sintéticas Lagrangianas, evidenció la importancia de esta aproximación para el estudio de los procesos de transporte en el área y permitió realizar inferencias acerca su relación con los procesos ecológicos asociados a estas zonas de retención. Finalmente se evaluó la relación entre los frentes lagrangianos identificados y la localización satelital (VMS) de la flota industrial pesquera uruguaya durante la evolución de un evento de surgencia. En general, durante las actividades de pesca los buques se posicionaron sobre las líneas de máxima convergencia, sugiriendo una relación entre los procesos de retención y la localización de las especies objetivo de la flota. Se evidenció así la importancia de profundizar en el estudio de procesos físicos que determinan la generación de zonas de retención y sus efectos sobre las comunidades biológicas.

PALABRAS CLAVE

Surgencias costeras, Modelación numérica, Aproximación Lagrangiana, Exponentes de Lyapunov de Tamaño Finito

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Esquema general de la circulación en el Atlántico Suroccidental. RdP= Río de la Plata, CCA= Corriente circumpolar Antártica. C.Atl Sur= Corriente del Atlántico Sur. Modificado de Matano et al., 2010. **5**
- Figura 2:** a) Ubicación del área de estudio. El rectángulo interno muestra el área que fue numéricamente simulada. b) *Zoom* de la región estuarina del Río de Plata (RdP) y área marina adyacente. Mvd = Montevideo, PdE = Punta del Este. Se marcan las isobatas de 10, 20 y 50 m y las zonas interna (I), intermedia (II) y externa (III) del Río de la Plata. **7**
- Figura 3:** Caudal de descarga diaria del Río de la Plata (m^3/s) para el período 2003 – 2012 (a) y caudal diario medio (m^3/s) para el mismo período (b). Datos proporcionados por Instituto Nacional del Agua de Argentina (Borús, 2019). **9**
- Figura 4:** Intensidad y dirección del viento promedio para el período 2003 - 2012 durante verano (Diciembre - Enero - Febrero, a) e invierno (Junio - Julio - Agosto, b). Datos obtenidos del reanálisis ERA5 (Hersbach et al., 2020). **10**
- Figura 5:** (a) Área de estudio donde el modelo CROCO fue seteado. El rectángulo interno corresponde al área donde los resultados fueron analizados y considerados para la identificación de las surgencias costeras. (b) batimetría de ETOPO1 (se muestran las isobatas de 5, 10, 15 y 20 m); Las ubicaciones i e ii marcan las regiones donde los datos superficiales de temperatura y salinidad fueron considerados para comparar con las observaciones; Transectos A y B son las secciones donde la estructura vertical de las surgencias fue analizada. **29**
- Figura 6:** SST ($^{\circ}\text{C}$) y velocidades promedio durante el verano registradas por el reanálisis GLORYS (a) y simuladas por CROCO Z5 (b). Evolución de la SST diaria durante el verano para la ubicación estuarina (c) y oceánica (d) registrada por MUR-GHRSST y simulada por CROCO. **32**

Figura 7: *Composites* de las SST costeras observadas (MUR-GHRSSST) y simuladas (CROCO Z5) para los veranos analizados (a y b), La Niña menos condiciones medias durante el verano (c y d), y el Niño menos condiciones medias durante el verano (e y f), para el período analizado. **35**

Figura 8: Salinidad superficial (SSS) durante el verano para GLORYS (a) y CROCO Z5 (b). Se marcan las isohalinas 10, 20, 25, 30 y 32. Variabilidad diaria de la SSS simulada y de GLORYS para la ubicación costera oceánica (c) y estuarina (d). **37**

Figura 9: Primer modo de variabilidad para las anomalías de SST observadas y de viento zonal NCEP2 (a y b), y para las anomalías de SST simuladas en CROCO Z5 y de viento zonal NCEP2 (c y d). **38**

Figura 10: Series de tiempo asociadas con el primer modo del MCA: *a* y *b* vientos zonales y MUR-GHRSSST, *c* y *d* vientos zonales y CROCO Z5 SST. **39**

Figura 11: *Composites* de anomalías de SST (°C) durante las fechas de surgencia intensa (surgencias observadas para los días de surgencia intensa y lag +2) para MUR-GHRSSST (a,c,e), CROCO Z5 (b,d). Se muestran también los *composites* de anomalías de esfuerzo del viento (Nm⁻²). **42**

Figura 12: *Composites* de anomalías de SSS (aS,a,c,e) y anomalías de velocidad zonal (ms⁻¹ au, b,d,f) durante las fechas de surgencia para CROCO Z5. **43**

Figura 13: Estructura de las anomalías de Temperatura (aT, °C) durante las fechas de surgencia intensas para CROCO Z5. Los paneles superiores se corresponden con el transecto A, estuarino: a) lag-2, b) lag0, c) lag+2. Los paneles inferiores se corresponden con el transecto B, oceánico: d) lag-2, e) lag0, f) lag+2. La figura superior derecha se corresponde con los transectos considerados. La línea negra indica el contorno cero. **45**

Figura 14: Análoga a Figura 13, pero para las anomalías de Salinidad (aS). Resultados para CROCO Z5. **46**

Figura 15: Distribución de Temperatura vertical (T , °C) para dos surgencias distintas ocurridas durante enero en transectos localizados en la costa oceánica uruguaya. Simulada por CROCO Z5 (a) y medida *in situ*, obtenida del WOD (b). Notar las distintas escalas de temperatura utilizadas. **46**

Figura 16: Análoga a la Figura 9, pero para anomalías de velocidad zonal (au , m/s). Resultados para CROCO Z5. **47**

Figura 17: Estructura de las anomalías de velocidad vertical (aw , ms^{-1}) durante eventos de surgencia para el transecto estuarino, A (a-c) y B (d-e). Resultados para CROCO Z5. **49**

Figura 18: *Composites* de anomalías de SST (°C) durante eventos de surgencia para (a) CROCO dc , (b) CROCO wc y (c) CROCO $dc+wc$. **50**

Figura 19: Densidad vertical promedio (ρ) para el transecto A estuarino (a-c) y densidad vertical promedio para el transecto oceánico B (d-f) para los experimentos CROCO Z5, CROCO dc y CROCO wc . **51**

Figura 20: *Composites* de anomalías de SST (°C) durante las fechas de surgencias en años La Niña para (a) observaciones (MUR-GHRSST), (b) CROCO Z5, (c) CROCO dc , (d) CROCO wc y (e) CROCO $dc+wc$. La caja donde las anomalías promedio de SST fueron calculadas en todos los experimentos se muestra en (f). **53**

Figura 21: Área de estudio donde se configuró el modelo CROCO en su configuración interanual, incluyendo las forzantes de mareas. El rectángulo interno se corresponde con el área donde la técnica de los Exponentes de Lyapunov fue aplicada. Las ubicaciones *i* e *ii* marcan las ubicaciones donde se consideraron los campos de temperatura y salinidad superficial para comparar el modelo con observaciones; mientras que *a* y *b* son las ubicaciones donde fueron liberadas partículas sintéticas en el modelo ICHTHYOP. **58**

- Figura 22:** SSS media registrada por el reanálisis GLORYS y simulada por CROCO (A y B). SST ($^{\circ}\text{C}$) media registrada por el reanálisis GLORYS y simulada por CROCO, se muestran también los vectores de velocidad superficial registrados por GLORYS y simulados por CROCO (B y D). **59**
- Figura 23:** Evolución superficial de la SST y SSS diaria durante el verano para la ubicación estuarina (a y c) y la ubicación oceánica (b y d) para el reanálisis GLORYS y simulada por CROCO. **60**
- Figura 24:** Primer modo del análisis de SVD entre las anomalías de vientos zonales (A) y de SST simuladas (B). Series de tiempo asociadas con el primer modo: viento zonal (C) y CROCO SST (D). **62**
- Figura 25:** Mapas de prueba de FSLE (días^{-1}) computados para una fecha de surgencia seleccionada arbitrariamente (31 Enero de 2008) para distintos valores de δi : (A) 0.1° , (B) 0.05° , (C) 0.03° y (D) 0.01° . El parámetro δf se fijó en 0.3° . **67**
- Figura 26:** Mapas de prueba de FSLE (días^{-1}) computados para una fecha de surgencia (31 Enero 2008) para valores de δf : (a) 0.1° , (b) 0.2° , (c) 0.3° y (d) 0.4° . El parámetro δi fue seteado a 0.01° . **68**
- Figura 27:** Promedio de FSLE (días^{-1}) calculados para (a) verano 2004 - 2012 (Diciembre - Enero - Febrero) y (b) para fechas de surgencia intensas obtenidas a partir del MCA. **70**
- Figura 28:** Mapas de LCS obtenidos para distintas fechas de surgencia intensa (las fechas especifican el comienzo de la simulación de las trayectorias hacia atrás en el tiempo). **72**
- Figura 29:** Mapas de LCS obtenidos para distintas fechas en que no se registraron eventos de surgencia intensa (las fechas especifican el comienzo de la simulación de las trayectorias hacia atrás en el tiempo). **72**
- Figura 30:** SST simulada con CROCO durante fechas de surgencia intensa, se muestran las líneas de LCS para (a) 21 Enero 2006, (b) 21 Febrero 2008, (c) 05 Enero 2011 y (d) 04 Enero 2012. **74**

Figura 31: SST observada (MUR-GHRSST) (A) y distribución satelital de Clorofila *a* (MODIS-AQUA) (B) para el 21 de Febrero de 2008. Se muestran superpuestas las líneas de LCS.. **75**

Figura 32: Evolución de las líneas de LCS durante el evento de surgencia de Febrero de 2008. Se muestran las trayectorias de las partículas simulados por ICHTHYOP (puntos rojos y azules) sobre las líneas de LCS. **77**

Figura 33: Evolución de las líneas de LCS durante el evento de surgencia de Enero de 2011. Se muestran las trayectorias de las partículas simulados con ICHTHYOP (puntos rojos y azules) sobre las líneas de LCS. **78**

Figura 34: Área en la que se analizó la operación de la flota Categoría B y su relación con los frentes Lagrangianos. Las líneas punteadas representan los límites de las áreas de veda pesquera los cuales no pueden ser atravesados hacia la costa ni hacia el Oeste por los buques categoría B. Mvd= Montevideo, PdE= Punta del Este y LP=La Paloma. **84**

Figura 35: Mapas de LCS obtenidos para distintas fechas en que se registraron eventos de surgencia intensa (las fechas especifican el comienzo de la simulación de las trayectorias hacia atrás en el tiempo). Se muestran las emisiones satelitales (VMS) de la flota pesquera Categoría B durante las actividades de pesca (puntos rojos). **87**

Figura 36: Promedio de temperatura de superficie del mar (SST) simulada (a) y observada (b) durante el evento de surgencia analizado. C- Promedio de los Exponentes de Lyapunov de Tamaño finito (FSLE) calculados durante el evento de surgencia analizado. D- Área de estudio Mvd=Montevideo, PdE=Punta del Este, LP=La Paloma. **88**

Figura 37: Salinidad y temperatura superficial (SS y SST, a y b) e imagen de color *True Color* de Modis Aqua (c) para el día 21 de Febrero de 2008. Superpuestas se encuentran las líneas de LCS (negro) y las posiciones de buques categoría B registradas por VMS para esa fecha (verde). **89**

Figura 38: Evolución de las LCS (líneas negras) durante el evento de surgencia de Febrero de 2008. Se muestran las emisiones satelitales (VMS) de la flota pesquera Categoría B durante las actividades de pesca (puntos rojos). Las líneas grises representan las zonas de veda pesquera. **91**

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Fechas de los eventos de surgencia intensa simulados **62**

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción general

El creciente desarrollo de las actividades humanas en el mar supone un aumento de las presiones e impactos sobre los ecosistemas. Para lograr un manejo adecuado de estos ambientes, es necesario conocer los procesos hidrodinámicos responsables de estructurar las comunidades. En este sentido, los procesos oceanográficos presentan una dinámica a varias escalas espacio – temporales (Hyrenbach et al. 2000; Acha et al., 2008), involucran movimientos verticales y horizontales de las masas de agua y poseen implicancias ecológicas a distintos niveles. En particular, determinan el transporte de sedimentos, nutrientes, gases, organismos tanto en la dirección vertical como en la horizontal y en superficie desde regiones de dispersión a regiones de retención, con consecuencias en toda la trama trófica y procesos biogeoquímicos (Kinlan & Gaines 2003; Shanks et al. 2003; Gaines et al., 2007; Rossi et al., 2009).

En este sentido, tanto a partir de sensoramiento remoto y simulaciones numéricas, como a partir de observaciones *in situ* de trazadores (como temperatura superficial y concentración de clorofila *a*) se evidencian fuertes contrastes en el océano superficial. Estos contrastes se deben al encuentro de masas de agua con características termohalinas diferentes transportadas por corrientes en la dirección horizontal. Éstas son denominadas zonas frontales en el océano. Se comportan como barreras al transporte, generando una diferenciación de ambientes con implicancias a distintas escalas espacio - temporales. En ellas quedan retenidos nutrientes y organismos, y se caracterizan por la acumulación de biomasa fitoplanctónica, retención de larvas y huevos de peces e invertebrados. Son comúnmente utilizadas como sitios de alimentación por invertebrados, peces, aves y mamíferos marinos,

así como también para la reproducción y cría de peces e invertebrados (Acha et al., 2004; Acha et al., 2015; Martínez y Ortega 2015).

Allí, procesos de turbulencia horizontal organizan los trazadores en filamentos de extensión y duración variable. En este sentido, es reconocido que procesos de circulación en general y de turbulencia horizontal en particular, modulan la estructura y biomasa de los ecosistemas marinos. Pueden estimular la productividad primaria (McGillicuddy et al., 1998; Oschlies & Garçon, 1998), afectar la composición de fitoplancton, (Owen, 1981; Mackas et al., 2005; Rossi et al., 2009) y tener un rol significativo en los procesos de intercambio de nutrientes y organismos entre distintas regiones del océano (Kinlan & Gaines 2003; Shanks et al. 2003; Gaines et al., 2007; Rossi et al., 2009). Adicionalmente, es reconocido que para la mayoría de las especies marinas, existen intercambios entre sub-poblaciones a través de la dispersión que ocurre en los primeros estadios de vida (huevos y larvas) transportados por las corrientes desde áreas de intercambio hacia áreas de retención, con implicancias en la estructura y conservación de estas poblaciones (Kinlan & Gaines 2003; Shanks et al. 2003; Gaines et al., 2007; Siegel et al. 2008; Rabellino, 2016).

Por otra parte, se evidencian también en el océano procesos que involucran movimientos verticales de agua, los cuales también poseen consecuencias ecológicas a distintos niveles. En este sentido, las surgencias costeras (o afloramientos costeros) son procesos oceanográficos que implican movimientos ascendentes de parcelas de agua desde profundidad hacia superficie, determinando el transporte vertical de sedimentos, nutrientes y organismos. Estos procesos se producen debido a la acción de vientos paralelos a la costa que junto a la rotación de la Tierra, determinan un transporte del agua superficial hacia mar adentro. Así, agua de profundidad alcanza la superficie para ocupar su lugar, siendo en general más fría y rica

en nutrientes. Pueden ser identificados desde la superficie como un enfriamiento del agua superficial (Tomczak & Godfrey, 2003).

Las grandes zonas de surgencias costeras se encuentran localizadas en los bordes Este de las cuencas oceánicas y son reconocidas como las regiones más productivas del planeta, soportando hasta el 20% de las capturas pesqueras globales (Pauly & Christensen, 1995). El enriquecimiento en nutrientes de las aguas superficiales explica la elevada productividad primaria de estas áreas. Adicionalmente una vez que las aguas frías llegan a la superficie se mueven horizontalmente, determinando el desarrollo de corrientes horizontales, frentes de convergencia, plumas costeras en áreas de retención, filamentos y *eddies* que se relacionan con la distribución del fitoplancton y otros organismos. Es también reconocido que los procesos de turbulencia derivados de las surgencias modulan la estructura y biomasa de los ecosistemas marinos, dado que pueden estimular la productividad (McGillicuddy et al., 1998; Oschlies & Garçon, 1998), afectar la composición de fitoplancton (Owen, 1981; Kang et al., 2005; Mackas et al., 2005) y jugar un rol en los procesos de intercambio entre las zonas costeras más productivas y el océano abierto oligotrófico mediante el transporte de materia orgánica y organismos desde las regiones costeras al océano abierto (Moore et al., 2007). En particular este mecanismo es responsable de su gran productividad costera y de la exportación al océano a través de la formación de filamentos y *eddies* lo que vuelve a estas regiones tan importantes en los ciclos globales como el del carbono y nitrógeno (Mackas et al., 2006).

Así, el estudio de los procesos físicos en general, de la dinámica de las surgencias costeras, de turbulencia horizontal y la identificación de áreas de retención en el océano viene recibiendo un interés creciente en los últimos tiempos, debido a sus implicancias biológicas, como ser su utilidad para delimitar provincias hidrodinámicas (Rossi et al., 2014) o para caracterizar la

conectividad entre ambientes (Siegel et al., 2008; Trembl et al., 2012; Kool et al., 2013).

1.2 Atlántico Suroccidental

La región del Atlántico Suroccidental (ASO) se encuentra caracterizada por la confluencia de las corrientes de Brasil y de Malvinas. La corriente de Brasil es la corriente de borde Oeste del giro subtropical del Atlántico Sur. Se origina como una ramificación de la corriente Sur Ecuatorial y transporta agua cálidas y salinas hacia el Sur, mientras que la corriente Malvinas se origina como un meandro de la corriente Circumpolar Antártica y transporta aguas más diluídas y frías hacia el Norte (Matano et al. 2010). Estas corrientes confluyen entre los 33 y 38°S, donde se separan de la plataforma formando un intenso frente (Piola & Gordon, 1989), (Figura 1).

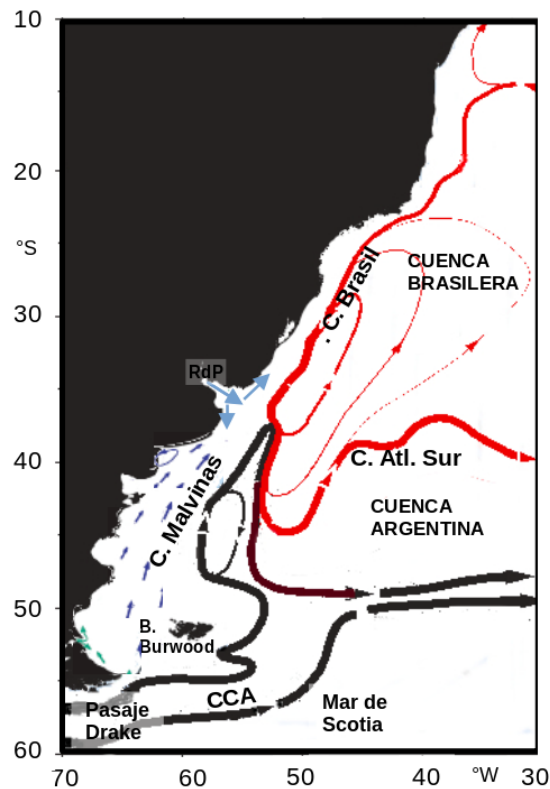


Figura 1: Esquema general de la circulación en el Atlántico Suroccidental.

RdP= Río de la Plata, CCA= Corriente circumpolar Antártica. C.Atl Sur= Corriente del Atlántico Sur. Modificado de Matano et al., 2010.

La zona de convergencia entre las corrientes de Brasil y de Malvinas es distinguida como una de las regiones más energéticas del planeta (Chelton et al., 1990). La convergencia migra hacia el Sur en verano, posiblemente como parte de un desplazamiento general hacia el Sur del giro subtropical en respuesta a una posición más Sur del sistema de altas presiones atmosférico (Tomczak & Godfrey, 2003).

Los frentes generados por la confluencia Brasil - Malvinas determinan la existencia de gradientes horizontales pronunciados, tanto de temperatura como de salinidad. Además, las zonas frontales están relacionadas con movimientos verticales del agua, facilitando que nutrientes presentes en

profundidad alcancen la superficie (Brandini et al., 2000; Olson, 2000; Conkright et al., 2002). Estos procesos sumados a la descarga continental de material orgánico y nutrientes producida por el RdP y a la existencia de surgencias de quiebre de plataforma determinan una elevada concentración de clorofila *a* y producción primaria en el área (Ciotti et al., 1995, Brandini et al., 2000; Saraceno et al., 2005).

En particular para el ASO, los procesos de transporte, retención y mezcla han sido estudiados exclusivamente sobre la confluencia Brasil - Malvinas. En este sentido, d'Ovidio et al. (2010) estudiaron el rol de la turbulencia de mesoescala sobre organizaciones espacio - temporales de fitoplancton, combinando datos satelitales con diagnósticos Lagrangianos. Encontraron que las comunidades fitoplanctónicas se organizan en parches de (sub)mesoescala (10-100 km) dominados por una o pocas especies, separados por frentes físicos inducidos por procesos de turbulencia horizontal. Estos frentes, de unas pocas semanas de duración, delimitan nichos donde las masas de agua presentes tienen similar historia y cuyos tiempos de vida son similares a los del *bloom* en sí. Sin embargo los procesos de transporte, retención y mezcla de las parcelas de agua en áreas de plataforma y costeras en el ASO aún no han sido estudiados.

Sobre la plataforma continental, la migración estacional de la confluencia Brasil – Malvinas modifica las características de las masas de agua (Castro et al., 2006, Ortega & Martinez 2007). Así, en plataforma las masas de agua dependen de las características del agua advectada desde zonas oceánicas adyacentes y de modificaciones que sufren debido al intercambio de energía, masa y momento con la atmósfera, y de la descarga proveniente del estuario del RdP (Piola et al., 2000, Möller et al., 2008).

1.3 Región costera uruguaya y área marina adyacente

La región costera uruguaya y su área marina adyacente constituyen el área abordada en el presente trabajo (Figura 2). Comprende un sistema caracterizado por una marcada variabilidad espacio – temporal de las condiciones físicas y elevados niveles de productividad biológica (Guerrero & Piola, 1997; Acha et al., 2008; Ortega & Martínez, 2007; Martínez & Ortega, 2015). Es parte de un complejo sistema hidrológico que comprende la zona frontal del estuario del Río de la Plata (RdP) y del Océano Atlántico con corrientes de plataforma derivadas de las corrientes de Brasil y de Malvinas.

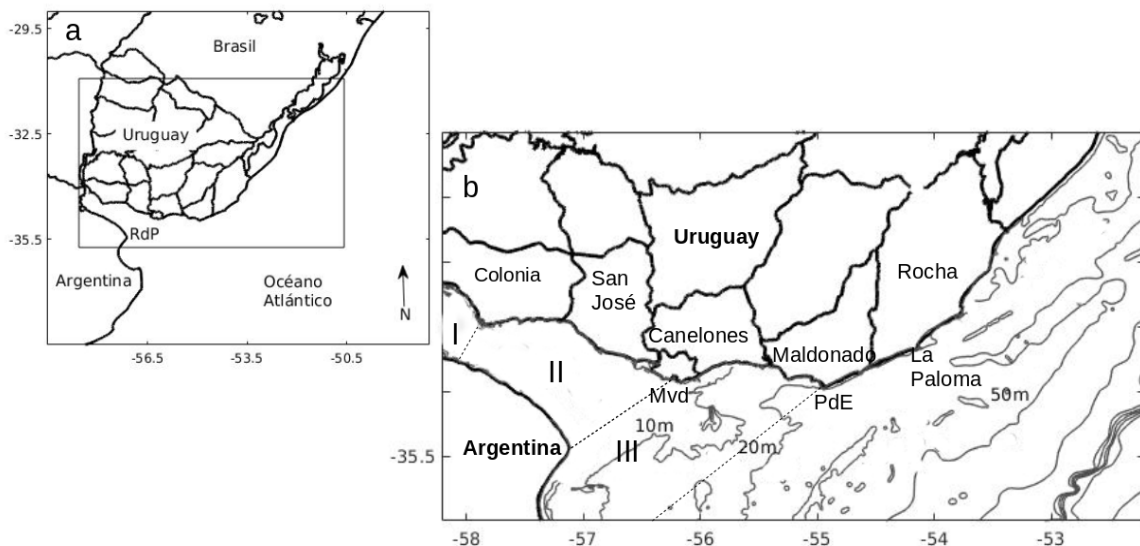


Figura 2: a) Ubicación del área de estudio. El rectángulo interno muestra el área que fue numéricamente simulada. b) *Zoom* de la región estuarina del Río de Plata (RdP) y área marina adyacente. Mvd = Montevideo, PdE = Punta del Este. Se marcan las isobatas de 10, 20 y 50 m y las zonas interna (I), intermedia (II) y externa (III) del Río de la Plata.

El Río de la Plata se localiza en los 35°S y drena hacia el Océano Atlántico, tiene aproximadamente 280 km de largo y su ancho aumenta desde unos 20 km en su porción superior hasta unos 220 km en su límite exterior.

Usualmente se lo divide en zona interna, intermedia y externa para su estudio (Figura 1). Las zonas intermedia y externa se separan por una línea que se extiende desde Montevideo a Punta Piedras (Argentina) a lo largo de la cual se localiza un aumento en la profundidad denominado Barra del Indio (Sepúlveda et al., 2004).

El estuario del RdP comprende la segunda mayor cuenca de Sudamérica con una descarga media de $23000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Guerrero, et al., 1997a; Nagy et al., 2002). Más del 97% del drenaje del RdP proviene de los ríos Paraná y Uruguay, que drenan dos cuencas diferentes. Debido a la intensa descarga, al encontrarse con el océano se forma un intenso frente de salinidad. En superficie se distingue una pluma de agua de baja salinidad cuya influencia puede rastrearse a gran distancia (Guerrero et al., 1997a; Campos et al., 1999; Piola et al., 2000, 2008). Este frente afecta la circulación costera así como las condiciones de mezcla con implicancias oceanográficas importantes (Piola et al., 2000).

El volumen de descarga del estuario presenta variabilidad a distintas escalas de tiempo. A nivel estacional, presenta una baja estacionalidad registrándose los valores máximos en general sobre otoño - invierno (Guerrero et al., 1997a; Nagy et al., 2002; Piola et al., 2005; Guerrero et al., 2010). Adicionalmente, presenta marcada variabilidad interanual, asociada con los eventos El Niño-Oscilación Sur (ENOS), los cuales en promedio inducen mayor (menor) precipitación sobre la cuenca del RdP durante los episodios cálidos (fríos) respectivamente, determinando mayores (menores) descargas (Pisciotano et al., 1994; Barreiro 2010), (Figura 3).

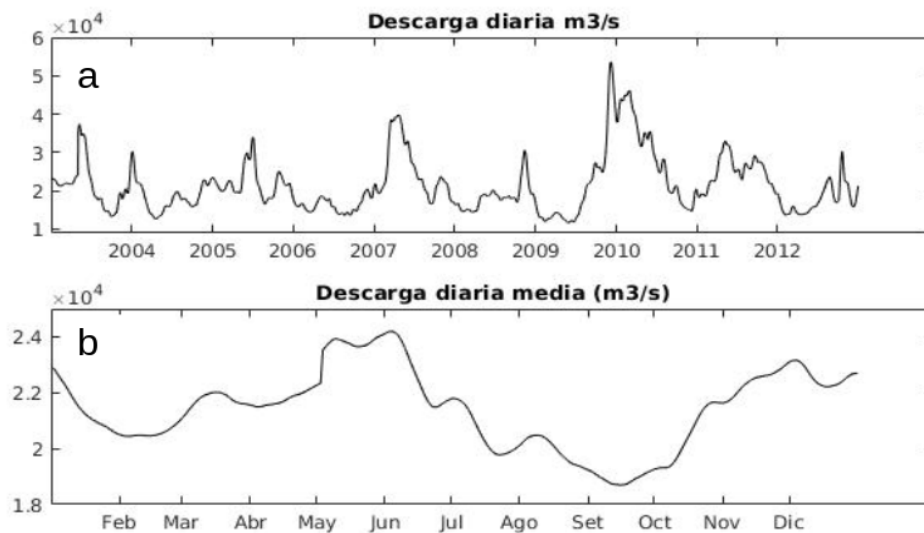


Figura 3: Caudal de descarga diaria del Río de la Plata (m^3/s) para el período 2003 – 2012 (a) y caudal diario medio (m^3/s) para el mismo período (b). Datos proporcionados por Instituto Nacional del Agua de Argentina (Borús, 2019).

La circulación y variabilidad del estuario del RdP a distintas escalas temporales se encuentran moduladas principalmente por la acción de los vientos (Piola et al., 2005; Simionato et al., 2007; 2008; 2010; Simionato & Nuñez, 2015). En este sentido, los patrones de viento observados en esta región presentan marcada variabilidad estacional, siendo predominantemente del sector S-SW durante el invierno y del sector N-NE durante el verano (Simionato et al., 2005). Asimismo, se observa que a escala estacional los vientos promedio son más intensos durante el verano (Figura 4).

A escala sinóptica, los vientos presentan gran variabilidad, modificando su dirección e intensidad con el pasaje de sistemas frontales y transientes atmosféricos (Simionato et al., 2010). Finalmente, a escala interanual, la variabilidad en los patrones de vientos se encuentra relacionada principalmente con las fases cálidas y frías de ENOS, de tal forma que durante las fases frías (La Niña) se observa durante el verano vientos

anómalos del sector E paralelos a la costa (Piola et al., 2005; Barreiro, 2010; 2017).

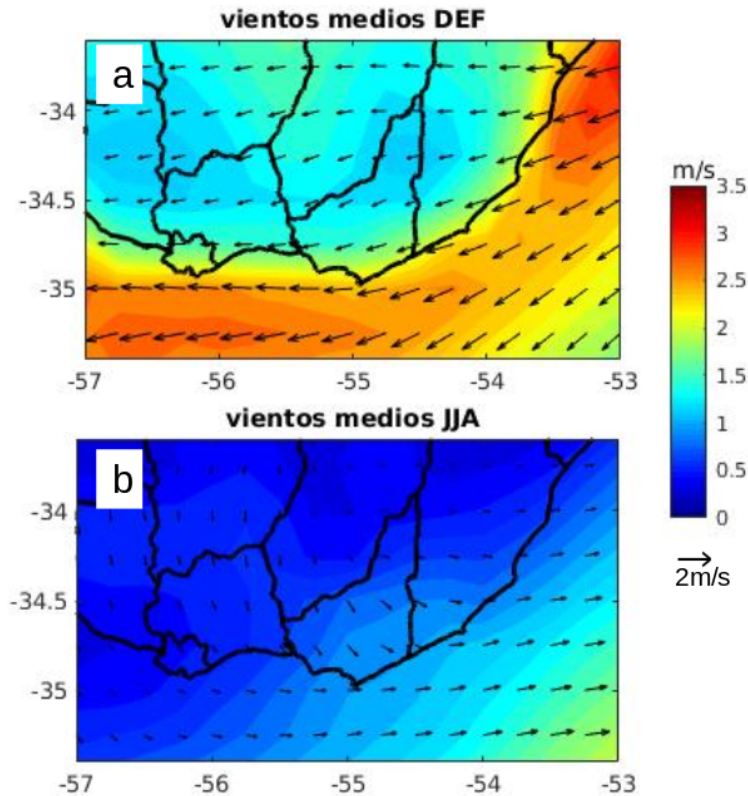


Figura 4: Intensidad y dirección del viento promedio para el período 2003 - 2012 durante verano (Diciembre - Enero - Febrero, a) e invierno (Junio - Julio - Agosto, b). Datos obtenidos del reanálisis ERA5 (Hersbach et al.,2020).

La posición de la pluma de descarga y del frente de salinidad en superficie presentan marcada variabilidad estacional en respuesta a los forzantes atmosféricos. Se distinguen así dos períodos en la localización del frente de salinidad en superficie. Durante otoño - invierno, se observa una deriva hacia el N-NE de las aguas del estuario a lo largo de la costa asociados a los vientos predominantes del sector S-SW. Durante primavera - verano la presencia de vientos predominantes del N-NE junto con bajos volúmenes de

descarga continental explican la presencia de agua dulce a lo largo de la costa Argentina hasta los 37°S y la penetración de aguas de plataforma hasta Punta del Este (Uruguay). Por su parte la localización del frente de salinidad de fondo no exhibe estacionalidad, debido a que la intrusión de aguas de plataforma están controladas por la batimetría. La estratificación vertical en forma de cuña salina es característica en las regiones intermedia y externa del estuario. Esta estratificación es destruida bajo la influencia de vientos moderados a fuertes (Guerrero et al., 1997a).

Asociados a vientos del sector N-NE y favorecidos por bajas descargas del RdP ocurren procesos de surgencia a lo largo de la costa uruguaya. Éstos han sido reportados como frecuentes y persistentes, así como estacionalmente variables, reportándose más frecuentemente durante el verano (Simionato et al., 2010, Meccia et al., 2013; Trinchin et al., 2019).

Las condiciones superficiales producidas por las surgencias durante el verano a lo largo de la costa uruguaya han sido estudiadas en detalle recientemente por Trinchin y colaboradores (2019) mediante el análisis de la distribución de la temperatura de superficie del mar (SST, por sus siglas en inglés) para el período 2003 - 2012. Los autores encontraron que los eventos de surgencia intensa durante el verano se desarrollan preferentemente en la región costera estuarina entre Montevideo y Punta del Este, y en la región costera oceánica entre Punta del Este y La Paloma. Además, sugieren que las condiciones de La Niña favorecen el desarrollo de eventos de surgencia intensa debido a la reducción de la descarga de RdIP así como a la presencia de vientos anómalos del E paralelos a la costa.

Adicionalmente a los vientos y descarga de agua continental como factores determinantes, la batimetría del fondo también puede jugar un rol sobre el desarrollo de surgencias costeras. En este sentido, la influencia de la topografía en la generación y desarrollo de surgencias ha sido previamente

estudiada en otras regiones (Freeland & Denman, 1982; Hickey, 1997; Chen et al., 2013; Wang et al., 2013). Por ejemplo, es conocido que variaciones topográficas tienen gran influencia en la circulación costera, tanto por interrumpir como por redireccionar el flujo costero, creando regiones de flujo más débil e incluso facilitando la mezcla (Pitcher et al., 2010, Largier 2020). En aquellas regiones donde las isobatas cambian abruptamente de dirección, las corrientes costeras pueden ser forzadas hacia mar adentro por el rápido cambio en la orientación de la topografía del fondo favoreciendo así la surgencia de aguas desde el fondo. La importancia de la topografía sobre la región costera uruguaya en particular, durante la generación de surgencias ha sido puntualmente propuesta en un estudio observacional (Pimenta et al., 2008).

Finalmente, otros posibles forzantes no son de importancia significativa a escala sinóptica y puntualmente sobre la generación de procesos de surgencia. En particular, las mareas en la región presentan amplitudes menores a 1 m (Framiñan et al., 1999; D'Onofrio et al., 1999; Simionato et al., 2004).

1.4 Justificación del trabajo

A pesar de la importancia ecológica y socioeconómica del área costera uruguaya, estudios que involucren los procesos oceanográficos costeros en general y las surgencias costeras en particular, así como sus implicancias son aún incipientes. En este sentido, los estudios acerca de las surgencias costeras en Uruguay, se basan en unas pocas observaciones *in situ* y datos de SST satelital (Framiñan et al., 1999; Pimenta et al., 2008; Simionato et al., 2010; Trinchin et al., 2019). Los campos de salinidad, circulación, y estructura vertical de las surgencias no han sido aún descritos, a excepción de un único caso en que datos *in situ* estuvieron disponibles (Pimenta et al., 2008).

De esta manera, las aproximaciones numéricas constituyen una herramienta útil para el estudio de las condiciones oceanográficas sobre la costa uruguaya en general y de las surgencias costeras en particular. Estudios previos han utilizado simulaciones numéricas en la región del RdP y área marina adyacente, exclusivamente bajo condiciones climatológicas e idealizadas. No hay simulaciones que representen la variabilidad interanual de alta frecuencia inducida por los vientos a lo largo de la costa uruguaya (Simionato et al., 2001; Meccia et al., 2013; Combes & Matano, 2014, Matano & Combes, 2014, Simionato & Nuñez 2015; Combes & Matano, 2018). Por ejemplo, Meccia y colaboradores (2013) simularon la respuesta de la salinidad del RdP bajo diferentes condiciones idealizadas y reprodujeron exitosamente surgencias inducidas por el viento bajo condiciones de vientos NNE.

Por otro lado, los procesos físicos y ecológicos relacionados a las surgencias de agua en sí, así como los procesos de transporte horizontal, dispersión y mezcla de las aguas costeras relacionadas a los afloramientos presentan crucial relevancia y no han sido aún estudiados en Uruguay. En este sentido, el afloramiento costero podría tener efectos tanto positivos como negativos sobre la productividad biológica.

Así, la surgencia de aguas potencialmente ricas en nutrientes podría tener efectos positivos favoreciendo *blooms* fitoplanctónicos así como la acumulación de huevos, larvas u otros organismos planctónicos en zonas de retención (Largier, 2020), mientras que el aumento de la turbidez producto de la resuspensión de sedimentos podría tener consecuencias negativas para organismos fitoplanctónicos. Por otro lado, la resuspensión de sedimentos posiblemente tenga otros efectos, como favorecer la ocurrencia de algas potencialmente dañinas (Grobbelaar, 1985; Kromkamp & Peene, 1999). Adicionalmente, organismos planctónicos, en particular cianobacterias y medusas que son frecuentes en nuestras costas y afectan la calidad de las

playas, podrían ser o retenidos sobre la costa o advectados hacia mar adentro debido a los procesos de retención e intercambio asociados a las surgencias.

Así, debido a su reconocida importancia, aproximaciones Lagrangianas que describan los procesos de turbulencia horizontal e identifiquen patrones de transporte relacionados con los procesos de surgencia costera han sido aplicadas en distintas regiones (Özgökmen et al., 2000; Molcard et al., 2006; Galan et al., 2012; Berta et al., 2014), pero no sobre la costa uruguaya. En este sentido, un mejor entendimiento tanto de la circulación y estructura vertical de las surgencias a lo largo de la zona costera, como de los procesos de retención e intercambio asociados desde una perspectiva Lagrangiana, mejoraría la comprensión de los procesos físicos reguladores de la dinámica de los ecosistemas sobre la costa uruguaya y podría ser utilizado como insumo para lograr un manejo adecuado de estos ambientes.

Finalmente, considerando la falta de datos *in situ* con amplia cobertura espacio-temporal sobre el área marina uruguaya, una aproximación numérica se considera necesaria tanto para entender mejor la dinámica detrás de los eventos de surgencia costera, como para la aplicación de las aproximaciones Lagrangianas que permitan identificar los procesos de transporte asociados.

2. HIPÓTESIS DE TRABAJO Y OBJETIVOS

2.1 Hipótesis de trabajo

Las surgencias costeras que ocurren durante el verano en la costa uruguaya son generadas por la acción del viento con componente Norte - Noreste y facilitadas por las bajas descargas del Río de la Plata durante el período estival.

Los procesos de surgencia costera determinan una circulación horizontal donde el agua fría converge con el agua cálida circundante en superficie. Estos frentes de convergencia que se mueven, se reorganizan y eventualmente desaparecen, poseen implicancias en los procesos de transporte e intercambio entre las regiones costeras y plataforma.

2.2 Objetivos

2.2.1 Objetivo general

Comprender los procesos físicos reguladores de la generación, evolución y estructura tridimensional de las surgencias de verano sobre la costa uruguaya, así como sus implicancias en los procesos de transporte horizontal e inferir sus posibles consecuencias ecológicas, mediante la utilización conjunta por primera vez en la región de herramientas observacionales, numéricas, Lagrangianas y datos pesqueros.

2.2.2 Objetivos específicos

- a) Caracterizar tridimensionalmente y evaluar la evolución de las surgencias costeras durante el verano (Diciembre – Enero - Febrero) en la zona costera del Uruguay, utilizando datos observacionales de superficie y la aplicación del modelo numérico CROCO en el área.
- b) Evaluar el rol de la variabilidad interanual de vientos y descargas de agua dulce sobre el desarrollo de surgencias costeras en Uruguay

mediante la realización de simulaciones de sensibilidad con el modelo numérico CROCO.

- c) Analizar por primera vez las condiciones de mezcla horizontal sobre la costa uruguaya mediante la aplicación de una aproximación Lagrangiana (cómputo de los Exponentes de Lyapunov de Tamaño Finito) a partir de velocidades superficiales derivadas del modelo numérico CROCO.
- d) Caracterizar los procesos de transporte horizontal durante eventos particulares de surgencia a partir de la identificación de frentes de convergencia junto con la simulación del transporte Lagrangiano de partículas obtenido a partir de un modelo de dispersión de partículas (ICHTHYOP).
- e) Analizar la relación entre la posición de los frentes Lagrangianos identificados y la ubicación de la flota industrial pesquera costera (Categoría B) durante actividades de pesca.

El siguiente capítulo describe la metodología utilizada en términos generales para alcanzar los objetivos de la tesis. Los objetivos particulares *a* y *b* serán tratados en el Capítulo 4, los objetivos *c* y *d* en el Capítulo 5 y el objetivo *e* en el Capítulo 6. Finalmente el Capítulo 7 contiene la discusión general y perspectivas.

3. APROXIMACIÓN METODOLÓGICA GENERAL

3.1 Aproximación numérica

El estudio de las condiciones del océano mediante mediciones *in situ* presenta la ventaja de la precisión de la información obtenida, sin embargo ésta es usualmente espacial y temporalmente limitada, proveyendo así una foto exacta pero limitada del estado del océano. Adicionalmente, la información satelital de las variables generalmente tiene mayor resolución espacial y temporal que las mediciones directas, pero se encuentra limitada a las capas más superficiales del océano.

De esta manera, las mediciones del estado del océano no permiten un entendimiento completo del estado de las variables en toda la columna de agua y con amplia distribución espacio - temporal (Blumberg & Mellor, 1987). Debido a esta falta de información el desarrollo y utilización de simulaciones numéricas para describir procesos oceánicos y su evolución se vuelve relevante (Masumoto et al., 2004).

Los modelos numéricos hidrodinámicos constituyen una herramienta computacional que permite simular los procesos oceanográficos, plantear distintos escenarios y testear hipótesis. Recientemente, las condiciones hidrodinámicas en la región del ASO han sido simuladas en estudios como el de Combes & Matano (2014) y Rabellino (2016), donde se utilizan simulaciones numéricas de alta resolución del ASO anidadas en modelos de menor resolución y mayor dominio, utilizando para ello el modelo ROMS_AGRIF. Puntualmente, simulaciones numéricas de alta resolución que describan la circulación tri-dimensional en las regiones costeras de Uruguay y que consideren la variabilidad interanual de los vientos y las descargas de agua del Río de la Plata no han sido aún desarrolladas.

En este sentido, el CROCO (*Coastal and Regional Ocean Community Model*), es un sistema desarrollado a partir del modelo ROMS_AGRIF (Shchepetkin & McWilliams, 2005) junto con algoritmos de otros modelos (MARS3D y HYCOM), que permite realizar simulaciones precisas del océano en escalas finas, incluyendo las zonas costeras y su interacción con escalas mayores.

El CROCO resuelve numéricamente las ecuaciones primitivas. Para resoluciones mayores a 1 km, el océano se considera un fluido que puede ser descrito por las ecuaciones primitivas, las cuales son una simplificación de las ecuaciones de Navier-Stokes realizada a partir de ciertas consideraciones junto con una ecuación de estado no lineal que considera los trazadores temperatura y salinidad. Estas consideraciones son balance hidrostático, aproximación de Boussinesq, fluido incompresible, radio terrestre constante, capa oceánica mucho menor que el radio terrestre y parametrizaciones para la clausura de la turbulencia de pequeña escala.

Considerando un sistema de referencia solidario al giro de la Tierra, los balances de momento zonal (en x) y meridional (en y) quedan:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (vu) - fv = \frac{\partial \phi}{\partial x} + Fu + Du$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \nabla \cdot (v\upsilon) + fu = \frac{\partial \phi}{\partial y} + Fv + Dv$$

La evolución temporal de la concentración de un campo escalar $C(x,y,z,t)$ se encuentra gobernada por la ecuación de difusión – advección:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (vC) = Fc + Dc$$

La ecuación de estado está dada por:

$$\rho = \rho(T, S, P)$$

En la aproximación de Boussinesq, las variaciones de densidad se desprecian en las ecuaciones de momento excepto en su contribución a la fuerza de flotabilidad en la ecuación del momento vertical. Bajo la aproximación hidrostática, se asume además que el gradiente vertical de presión balancea la fuerza de flotación:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{-\rho g}{\rho_0}$$

Finalmente, la siguiente ecuación se corresponde con la ecuación de continuidad de volumen para un fluido incompresible (aproximación de Bussinesq)

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$$

Los términos Du , Dv y Dc representan los términos difusivos, mientras que Fu , Fc , Fv representan los forzantes. Por otro lado, u, v, w son las componentes del vector velocidad, f es el parámetro de Coriolis, g es la aceleración gravitatoria, $\Phi(x, y, z, t)$ representa la presión dinámica, $\phi = \frac{p}{\rho_0}$ con P siendo la presión total y $\rho_0 + \rho(x, y, z, t)$ constituye la densidad total *in situ*.

En las ecuaciones anteriores u, v, T y S son variables de pronóstico, mientras que w, P y ρ son variables de diagnóstico.

El modelo CROCO discretiza las ecuaciones en coordenadas curvilíneas que siguen la costa y topografía del terreno mediante métodos numéricos. El modelo aplica pasos de tiempo cortos para la resolver altura del nivel del mar (SSH, por sus siglas en inglés) y las ecuaciones de momento barotrópicas, y pasos de tiempo mayores para la obtención de las variables temperatura, salinidad y momento baroclínico. También presenta un procedimiento de promediado de tiempo en 2 vías para el modo barotrópico, que satisface la ecuación de continuidad 3D.

Adicionalmente, la aplicación de un algoritmo de paso de tiempo predictor - corrector de 3er orden específicamente diseñado permite un aumento en el tamaño del paso temporal (éste es descrito en detalle en Shchepetkin & McWilliams, 2005). Asociado al paso temporal de 3er orden, la aplicación de un esquema de advección – difusión de 3er orden permite la generación de gradientes pronunciados, aumentando la resolución efectiva de la solución para un tamaño de celda determinado (Shchepetkin & McWilliams, 1998). Los procesos de mezcla a la escala de sub - grilla son representados con un esquema de parametrización de capa límite con perfil K (KPP, por sus siglas en inglés) (Large et al., 1994). Finalmente, las coordenadas sigma poseen un esquema de suavizado basado en los números de Beckman – Haidvogel α_0 y el número de Haney α_1 (Song and Haidvogel, 1994)

El modelo, precisa información de las condiciones iniciales y de borde laterales de las variables oceanográficas y meteorológicas, de los forzantes superficiales y de la batimetría oceánica necesaria para construir la grilla, junto con parámetros necesarios para determinar la altura relativa de cada nivel sigma. Éstas pueden ser obtenidas de cualquier base de datos en formato NetCDF. Así, es posible definir una resolución horizontal y vertical según el proceso que se desee reproducir, permitiendo la simulación de procesos de pequeña escala.

En los Capítulos 4 y 5 se realizaron simulaciones con el modelo numérico descrito considerando tanto casos idealizados, donde los forzantes de superficie no presentan variabilidad interanual, como casos realistas donde los forzantes presentan variabilidad interanual de vientos y descargas del Río de la Plata. El análisis de las variables simuladas desde distintas perspectivas permitió responder a los objetivos planteados en la presente tesis.

3.2 Aproximación Lagrangiana

En las últimas décadas, han comenzado a utilizarse aproximaciones Lagrangianas para la descripción de los fenómenos de mezcla y transporte en el océano. Éstas se basan en seguir las trayectorias de las partículas de fluido. A diferencia de aproximaciones Eulerianas, que representan las condiciones oceanográficas en una grilla espacial, en las aproximaciones Lagrangianas es posible identificar estructuras espaciales que actúan direccionando el flujo debido a variabilidad espacio - temporal del campo de velocidades (Wiggins, 1992).

3.2.1 Exponentes de Lyapunov

Dentro de las técnicas Lagrangianas, una herramienta de diagnóstico con utilización creciente en la comunidad científica para identificar regiones frontales constituye el cálculo de los Exponentes de Lyapunov, los cuales miden la dispersión relativa de las partículas transportadas. Así, permiten detectar comportamientos caóticos mediante la medición del crecimiento de las perturbaciones que ocurren a lo largo de las trayectorias de las partículas. Para los sistemas geofísicos, el cálculo de estos exponentes es usualmente realizado de 2 dos maneras: para tiempos Finitos (FTLE, por sus siglas en inglés), donde se computa la distancia recorrida en determinado tiempo por la partícula (Haller, 2001; Beron Vera et al., 2008); o para Tamaños Finitos (FSLE, por sus siglas en inglés), donde lo que se computa es el tiempo que le toma a dos partículas inicialmente separadas cierta distancia alcanzar una separación final dada (Artale et al., 1997; Aurell et al., 1997; Boffetta et al., 2001).

Si bien los FTLE y FSLE son conceptualmente distintos, a partir de ambos se pueden identificar las estructuras que organizan el movimiento del fluido, Estructuras Coherentes Lagrangianas (LCS por sus siglas en inglés), como vórtices, barreras al transporte, frentes, etc). En este sentido, ha sido

demostrado que pueden alcanzarse visualizaciones similares de las zonas de retención e intercambio en el océano mediante ambas aproximaciones. Así, la preferencia por la utilización de uno u otro concepto en oceanografía aparentaría estar basada en cierta tradición dentro de la comunidad científica, más que en la existencia de ventajas demostradas (Peikert et. al., 2014).

En este trabajo el análisis Lagrangiano ha sido realizado por medio del cómputo de los FSLE. Estos exponentes están especialmente diseñados para estudiar las propiedades de contracción y estiramiento de los fluidos geofísicos (d'Ovidio et al., 2004). Sus valores máximos se organizan en líneas que caracterizan el flujo desde una perspectiva Lagrangiana (Joseph & Legras, 2002; Koh & Legras, 2002) e identifican las LCS (Haller & Yuan, 2000). Estas estructuras restringen el movimiento del fluido, actuando como barreras del transporte para las trayectorias de partículas y constituyen así una herramienta poderosa para la predicción de frentes generados por advección pasiva (d'Ovidio et al., 2004, 2009; Lehahn et al., 2007; Rossi et al., 2008).

Así, proveen una medida de la dispersión, turbulencia y mezcla horizontal, como función de la resolución espacial. Esta herramienta Lagrangiana, permite aislar los distintos regímenes correspondientes a distintas escalas de longitud en los flujos oceánicos. Estos exponentes se hallan calculando el tiempo τ en que dos partículas de fluido inicialmente separadas una distancia δ_0 alcanzan una separación final δf , siguiendo su trayectoria en un campo de velocidad bidimensional como:

$$\lambda(x, t, \delta_0, \delta f) = \frac{1}{\tau} \log \frac{\delta f}{\delta_0}$$

Se seleccionan así los puntos iniciales x sobre los nodos de una grilla cuya separación coincide con la separación inicial de las partículas δ_0 . Así los valores λ se obtienen en una grilla con separación δ_0 .

Dependiendo de la escala del proceso de interés es el valor de los parámetros a seleccionar; o sea, en procesos de mesoescala, δf suele ser tomada como 1° u 80 km (orden de tamaño de los eddies de mesoescala a latitudes medias; d'Ovidio et al., 2004; Hernández-Carrasco et al., 2011). Para computar λ se debe conocer la trayectoria de las partículas. Así, las ecuaciones del movimiento que describen la evolución horizontal de las trayectorias de partículas son computadas en coordenadas esféricas en las direcciones longitudinal y latitudinal (φ , θ , medidas en grados; $\delta\theta$, δf también medidas en grados):

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t} = \frac{u(\varphi,\theta,t)}{R\cos\theta}$$

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{v(\varphi,\theta,t)}{R}$$

donde, u y v son las componentes zonal y meridional de las velocidades y R el radio terrestre. Los valores de los FSLE dependen críticamente de la elección de las escalas de distancia, la separación inicial $\delta\theta$ y la final δf .

La integración temporal de la trayectoria de las partículas puede ser realizada hacia adelante o hacia atrás en el tiempo. Hacia atrás en el tiempo, los valores máximos de los FSLE se obtienen en las áreas de máxima convergencia. Contrariamente, los FSLE calculados hacia adelante en el tiempo exhiben los mayores valores en las regiones de mayor divergencia. En una aproximación hacia atrás, los valores máximos actúan como barreras en el transporte para las trayectorias de las partículas, por lo que de esta manera los FSLE constituyen herramientas poderosas para la predicción de frentes generados por advección pasiva (d'Ovidio et al., 2004; Lehahn et al., 2007; Rossi et al., 2008).

Los FSLE han demostrado ser especialmente adecuados para estudiar los procesos de transporte horizontal (d'Ovidio et al. 2004). Sus promedios

espaciales pueden definir una medida de la mezcla horizontal en un área determinada. Así a mayores valores, mayor es la actividad de mezcla. En este sentido ha sido demostrado que sirven para caracterizar la mezcla horizontal y el transporte de estructuras en la superficie marina, así como para correlacionar con trazadores tales como temperatura, clorofila y otras variables biológicas (D'ovidio et al., 2004; D'Ovidio et al., 2009; Rossi et al., 2008; Prants et al., 2014; Cotté et al., 2015; Nieblas, et al., 2014).

El cálculo de FSLE a partir de modelos de circulación o a partir de datos de altimetría por satélite ha sido utilizado activamente en el análisis de mezcla y transporte en el océano (Prants et al., 2014). En este sentido el cálculo de los FSLE ha sido utilizado para monitorear y predecir patrones de dispersión de derrames de hidrocarburos (Olascoaga et al., 2008; Olascoaga, 2010), para identificar *eddies* con riesgo de contaminación por radionucleidos derivados del accidente de Fukushima (Budyansky et al., 2015) y para identificar zonas frontales con condiciones favorables para la pesca (Prants et al., 2014; Prants et al., 2021), entre otras aplicaciones.

A pesar de que la utilización de este tipo aproximaciones Lagrangianas en estudios oceanográficos viene en aumento en los últimos tiempos, su utilización en el Océano Atlántico Suroccidental es aún muy incipiente, con solamente un par de ejemplos (D'Ovidio et al., 2010; Morel et al., 2014).

3.2.2 Modelo de seguimiento de partículas

Los modelos de seguimiento de partículas constituyen aproximaciones lagrangianas que se utilizan con el fin de investigar la influencia de las condiciones hidrodinámicas sobre la distribución espacial tanto de partículas sintéticas como de organismos vivos mediante un acoplamiento con modelos hidrodinámicos.

En este sentido, el software ICHTHYOP, desarrollado por IRD y PREVIMER y descrito en Lett et al. (2008), es un modelo basado en individuos (IBM) con varios submódulos, incluyendo uno de comportamientos biológicos. Así, el modelo permite evaluar cómo la física y los factores biológicos influyen en la dinámica de trazadores sintéticos y de organismos vivos. En este sentido, incorpora los procesos más importantes involucrados en la vida temprana de los organismos planctónicos: desove, movimiento, crecimiento, mortalidad y reclutamiento. La herramienta puede utilizar como entrada series temporales de los campos de velocidad, temperatura y salinidad de varios modelos oceánicos, entre ellos el modelo numérico CROCO.

En este trabajo, se utilizó el modelo ICHTHYOP exclusivamente con el fin de analizar el transporte de partículas sintéticas (consideradas como trazadores pasivos), de manera que solamente el submódulo de movimiento fue utilizado. Este submódulo simula los procesos de advección horizontal y vertical, junto con los procesos de dispersión horizontal y vertical.

4. SURGENCIAS A LO LARGO DE LA COSTA URUGUAYA: ESTRUCTURA VARIABILIDAD Y FACTORES CONTROLADORES¹

¹Publicación asociada: de Mello, C., Barreiro, M., Ortega, L., Trinchin, R., & Manta, G. (2022). Coastal upwelling along the Uruguayan coast: Structure, variability and drivers. *Journal of Marine Systems*, 230, 103735.

4.1. Introducción y objetivos del capítulo

La zona costera, estuarina y marina uruguaya, presenta eventos de surgencia estacional relacionados a vientos paralelos a la costa provenientes de dirección N-NE, los cuales inducen transportes mar adentro de aguas superficiales y surgencias de agua desde el fondo que alcanza la superficie (Simionato et al., 2010, Meccia et al., 2013; Trinchin et al., 2019). Considerando la ausencia de información con gran cobertura espacial y temporal de la columna de agua en general y de la estructura tridimensional de las surgencias en particular, una aproximación numérica en esta región se considera necesaria para el entendimiento de los fenómenos físicos que allí ocurren y permitan explicar los fenómenos ecológicos relacionados.

Para avanzar en la comprensión de la generación, evolución y estructura tridimensional de los afloramientos costeros en la costa uruguaya fueron utilizados datos observacionales y un modelo oceánico regional. Las fechas en las que se produjo el afloramiento más intenso durante el verano se identificaron mediante un Análisis de Máxima Covarianza entre un producto de SST de alta resolución y los vientos en superficie. Posteriormente, se implementó el modelo oceanográfico *Coastal and Regional Ocean Community Model* (CROCO) bajo una configuración interanual para caracterizar por primera vez la estructura tridimensional y la evolución de los afloramientos más intensos observados. En particular, nos enfocamos en el verano austral (Diciembre - Enero - Febrero, DEF) ya que es cuando ocurren los afloramientos más intensos (Trinchin et al., 2019). Adicionalmente, se abordó el rol de la variabilidad interanual de los vientos y de la descarga de agua

dulce sugerida en estudios previos (Pimenta et al., 2008; Simionato et al., 2010; Trinchin et al., 2019) mediante la realización de estudios de sensibilidad con el modelo numérico.

Este Capítulo está organizado de la siguiente manera; La sección 4.2 describe el modelo y la configuración experimental. La Sección 4.3 valida la habilidad del modelo para simular las condiciones medias durante el verano, así como la variabilidad diaria e interanual de los campos costeros superficiales comparando los resultados del modelo con reanálisis, datos observacionales y la literatura. En la Sección 4.4 realizamos un Análisis de Máxima Covarianza (MCA) entre los vientos superficiales y la SST observada para identificar las fechas en que ocurren los afloramientos más intensos en nuestra área de interés, las cuales se estudian en las siguientes secciones. Además, en esta sección se testea la habilidad del modelo para la detección de surgencias intensas, realizando un MCA entre los vientos superficiales y la SST simulada. La sección 4.5 analiza la estructura tridimensional durante las fechas en que ocurren los afloramientos más intensos. La Sección 4.6 utiliza experimentos especialmente diseñados para analizar el rol de la variabilidad interanual de los vientos y de la descarga del RdP en el desarrollo de surgencias. Finalmente, la sección 4.7 resume las conclusiones y proporciona comentarios finales.

4.2 Modelo numérico: Configuración y experimentos

El modelo utilizado en este estudio es el *Coastal and Regional Ocean Community Model* (CROCO, <https://www.croco-ocean.org/>). Es un modelo basado en el modelo *Regional and Ocean Community Model* (ROMS) y se encuentra diseñado para simular tanto procesos mar adentro como la dinámica costera en dominios regionales (Shchepetkin y McWilliams, 2005; Debreu et al., 2012).

CROCO es un modelo oceánico de coordenadas verticales que siguen la topografía del terreno. En este trabajo fue configurado con una resolución horizontal de $1/36^\circ$ (aproximadamente 2.5 km en la región de interés) y 40 niveles σ en la vertical. Seleccionamos los parámetros: $\sigma_s = 6$, $\sigma_b = 0$ y $h_c = 2$ m, que resultan en mayor resolución vertical para los niveles cercanos a la superficie. Una profundidad mínima de 5 m fue seleccionada. Esta profundidad se elige de manera de prevenir por ejemplo, la ocurrencia de celdas del modelo sin agua, y su valor no puede ser cero, sino que debe ser seleccionado considerando la resolución horizontal de la grilla.

La batimetría utilizada en las configuraciones del modelo analizadas proviene de *1 min Gridded Global Relief Data* (ETOPO1, Amante y Eakins, 2008) interpolada a la grilla del modelo. Un factor de suavizado de $r = 0.1$ ($r = \text{gradiente}(h)/h$) fue aplicado a la topografía de manera de prevenir errores de los gradientes horizontales de presión asociado con las coordenadas sigma (Haney, 1991).

El dominio considerado para las simulaciones contiene el área definida por $31^\circ \text{ S} - 36^\circ \text{ S}$ y $50^\circ \text{ W} - 59^\circ \text{ W}$, la cual incluye la costa Uruguay (Figura 5). Tiene fronteras abiertas en los lados Este, Oeste y Sur. Todas las condiciones oceánicas laterales fueron obtenidas del reanálisis GLORYS (Lellouche et al., 2018), que tiene una resolución horizontal de $1/12^\circ$.

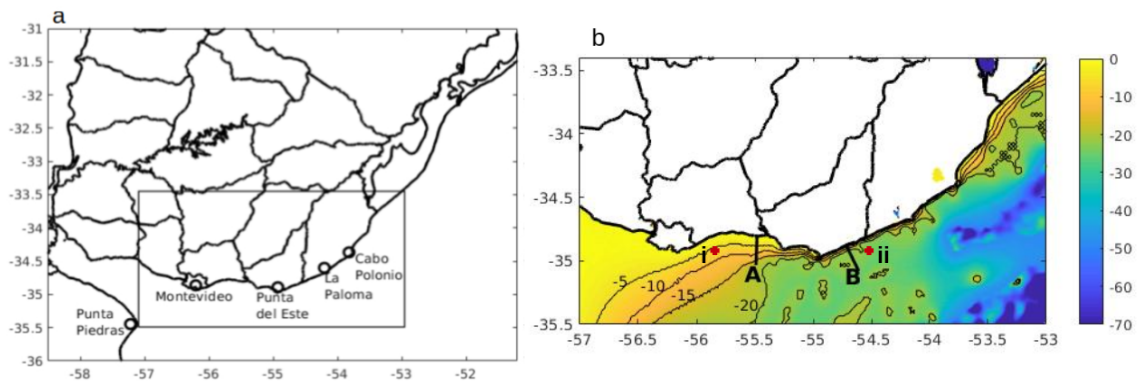


Figura 5: (a) Área de estudio donde el modelo CROCO fue seteado. El rectángulo interno corresponde al área donde los resultados fueron analizados y considerados para la identificación de las surgencias costeras. (b) batimetría de ETOPO1 (se muestran las isobatas de 5, 10, 15 y 20 m); Las ubicaciones i e ii marcan las regiones donde los datos superficiales de temperatura y salinidad fueron considerados para comparar con las observaciones; Transectos A y B son las secciones donde la estructura vertical de las surgencias fue analizada.

La descarga interanual diaria del Río de la Plata fue solicitada al Instituto Nacional del Agua de Argentina (Borús, 2019), e introducida en el modelo en 2 puntos de descarga en el RdP, sobre la región de la confluencia de los ríos Paraná y Uruguay. Como forzantes de superficie del modelo se utilizaron vientos diarios provenientes del reanálisis NCEP-DOE 2 (Kanamitsu et al., 2002), así como flujos mensuales de calor y agua dulce (precipitación menos evaporación) derivados del *Ocean Atmosphere Data Set* (COADS, Da Silva et al., 1994).

El flujo de calor incluye una tendencia a la climatología media mensual del producto AVHRR Pathfinder SST (Casey & Cornillon, 1999) computada como:

$$Q_{model} = Q_{COADS} + dQ_{dSST} \times (SST_{model} - SST_{pathfinder})$$

Donde QCOADS es el flujo de calor proveniente de la climatología de COADS y $dQdSST$ es la sensibilidad del flujo de calor neto de la superficie cinemática a la SST computada según Barnier et al. (1995). Debido a que las surgencias son una respuesta mecánica al esfuerzo del viento, los forzantes climatológicos de los flujos de calor así como su término de amortiguación a las SST climatológica no influyen la ocurrencia de surgencias, pero sí podrían reducir la intensidad del enfriamiento superficial.

El flujo de agua superficial también incluye un término restaurador a la climatología de la salinidad superficial media mensual de COADS, utilizando el siguiente factor de corrección:

$$SSFLX_{modelo} = SSS(E - P) + CST(SSS_{modelo} - SSS)$$

donde $CST = \frac{dQdSST}{10}$.

Por defecto, el modelo utiliza $CST=dQdSST$. Sin embargo, en este trabajo reducimos su valor debido a que el término por defecto acercaba demasiado el valor de salinidad superficial a la salinidad de COADS la cual no es realista en el área y no permitía por lo tanto, una simulación adecuada de la salinidad en el estuario y en la región cercana a la costa. Más adelante se muestra que el valor reducido del término permite representar adecuadamente el efecto de la descarga de agua del RdP en la región costera uruguaya.

Previo a realizar una simulación interanual, se realizó una simulación climatológica de 5 años como *spin up*, de manera de alcanzar un estado estable de todas las variables. El modelo fue forzado con flujos medios mensuales de los forzantes superficiales y con condiciones laterales medias mensuales provenientes del *World Ocean Atlas 2009* (WOA 2009). Las condiciones iniciales fueron obtenidas del WOA 2009 para el mes de enero. Durante la simulación de *spin up*, el modelo fue también forzado con

descargas constantes del RdP con un volumen total de $23000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ubicadas en la misma posición que en las simulaciones interanuales. La profundidad mínima del modelo considerado en esta simulación fue también de 5 m.

Luego de los 5 años de simulación climatológica de *spin up*, una vez alcanzado un estado estable de todas las variables del modelo, fue realizada una simulación Control (en adelante CROCO Z5) desde el 1ero de enero de 2003 hasta el 31 de diciembre de 2012. Los campos de velocidad horizontal y vertical promedio diario e instantáneos, así como los campos de temperatura y salinidad fueron guardados cada día.

De manera de evaluar la importancia del viento y de la descarga de agua dulce en la generación de surgencias intensas a lo largo de la costa uruguaya, 3 experimentos adicionales fueron realizados solamente considerando los veranos 2003 - 2012. Estas simulaciones fueron inicializadas desde CROCO Z5 y utilizan la misma grilla, parámetros y condiciones, pero difieren en los forzantes aplicados. El primer experimento fue corrido con descargas diarias climatológicas y con vientos diarios interanuales (en adelante, CROCO *dc*); el segundo fue corrido con vientos diarios climatológicos y descargas diarias interanuales (en adelante, CROCO *wc*); y el tercero fue corrido con vientos y descargas diarios climatológicos (en adelante, CROCO *dc+wc*).

4.3 Validación del modelo: Campos medios y variabilidad

Se validó el modelo utilizando CROCO Z5 (el caso Control) con énfasis en la región costera durante el verano, por ser el área y estación de interés. Las variables simuladas fueron comparadas con reanálisis, datos observacionales e información publicada. La SST promedio simulada fue comparada con la de *Group of High Resolution Sea Surface Temperature* (MUR-GHRSSST SST), la cual consiste en imágenes satelitales diarias de 1 km de resolución (Chin et al., 2017, disponible en <http://www.ghrsst.org>) y también con el reanálisis

GLORYS, el cual fue utilizado como condición lateral. La salinidad superficial (SSS) promedio simulada fue comparada con el reanálisis *Global Ocean Forecasting System* (GOFS, Cummings and Smedstad, 2013), el *CMCC Global Ocean Physical Reanalysis System* (CGLORS, Storto and Masina, 2014), el reanálisis *Simple Ocean Data Assimilation* (SODA, Carton and Giese, 2008) y también con el reanálisis GLORYS. Finalmente, la variabilidad diaria de SST y SSS simuladas fueron comparadas con observaciones y reanálisis en dos ubicaciones costeras: una en la región costera estuarina (ubicación *i*) y la otra en la región costera oceánica (ubicación *ii*).

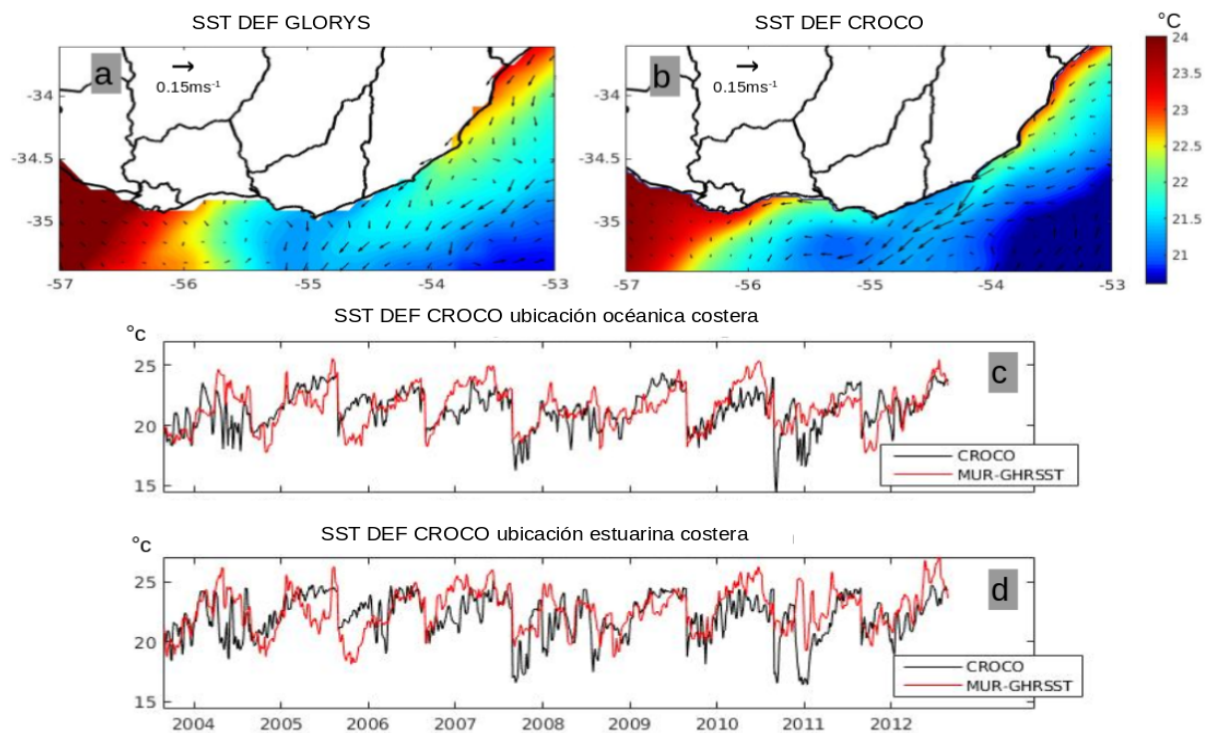


Figura 6: SST (°C) y velocidades promedio durante el verano registradas por el reanálisis GLORYS (a) y simuladas por CROCO Z5 (b). Evolución de la SST diaria durante el verano para la ubicación estuarina (c) y oceánica (d) registrada por MUR-GHRSSST y simulada por CROCO.

En general, la simulación Control produce una representación adecuada de las corrientes costeras de la región, salinidad y distribución de temperaturas

(Figuras 6, 7 y 8). La circulación se encuentra dominada por corrientes del noreste, las cuales son más intensas en CROCO en comparación con el reanálisis GLORYS, posiblemente debido a la mayor resolución del modelo. La altura de superficie del mar promedio obtenida en la simulación resultó concordante con la literatura (Guerrero, 1997a; Moller et al., 2008; Simionato et al., 2010; Guerrero et al., 2010; Rabellino 2016). En este sentido, un mínimo de SST fue claramente observado (MUR-GHRSST), representado por el reanálisis GLORYS y simulado por CROCO Z5 durante el verano en la región oceánica de la costa uruguaya (Figuras 6 a-b y 7 a-b). Este patrón es concordante con el encontrado por Saraceno et al. (2014) y por Strub et al. (2015); quienes lo explicaron como el efecto de la acción conjunta de la variabilidad estacional del viento y la orientación de la costa, que fuerza un régimen favorable a la ocurrencia de surgencias durante el verano. Esta surgencia climatológica presenta un máximo localizado entre Punta del Este y La Paloma. Sin embargo, comparado con el reanálisis GLORYS y con el producto MUR-GHRSST el modelo presenta un *bias* frío ubicado principalmente en la región oceánica y hacia mar adentro.

Finalmente, el modelo simula la variabilidad diaria de la SST de manera adecuada. En este sentido, la correlación entre las SST diarias del producto MUR-GHRSST y CROCO Z5 son significativas en las dos ubicaciones consideradas (siendo 0.60 para la ubicación costera oceánica y 0.45 para la estuarina, respectivamente), (Figura 6 c y d). Es relevante mencionar que los relativamente bajos niveles de correlación entre MUR-GHRSST y CROCO Z5 posiblemente sean debidos a la ausencia de variabilidad diaria en los flujos de calor que fuerzan el modelo (adicionalmente al *bias* frío), los cuales son un importante controlador de la SST en la región, de acuerdo a Trinchin et al. (2019). Sin embargo es resaltable que a pesar de ello, el modelo sea capaz de simular una parte considerable de la varianza en los puntos individuales de

grilla. Una comparación más profunda entre el modelo y las observaciones es realizada a continuación enfocándonos exclusivamente en las surgencias.

Durante el período analizado, de acuerdo al Índice Océnico el Niño (ONI), hubo 3 veranos caracterizados por una fase cálida del ENSO (El Niño, 2004-2005, 2006-2007 and 2009-2010) y 5 veranos caracterizados por la fase fría del ENSO (La Niña, 2005-2006, 2007-2008, 2008-2009, 2010-2011 y 2011-2012). Como se ha mencionado en la introducción de la tesis, la Niña tiende a inducir vientos anómalos del sector Este paralelos a la costa junto con menores descargas del RdP y por tanto sería esperable la ocurrencia de surgencias más intensas durante estos períodos. La figura 7 muestra que de hecho es lo que ocurre: la temperatura promedio observada durante el verano sobre la porción oceánica de la costa es más fría durante los períodos La Niña (Figura 7 c). También, durante La Niña menores valores de SST que el promedio son observadas en la porción estuarina de la costa, posiblemente relacionadas a mayores y más intensos eventos de surgencia entre Montevideo y Punta del Este. El patrón contrario fue observado durante los períodos en que se registró El Niño, observándose aguas más cálidas de lo normal en superficie a lo largo de la costa uruguaya (Figuras 7a,c,e). El modelo captura un comportamiento similar a las observaciones, pero registrando menores diferencias en la porción oceánica de la costa entre los períodos en que ocurrió El Niño, La Niña y las condiciones medias durante el verano (Figuras 7 b,d,f).

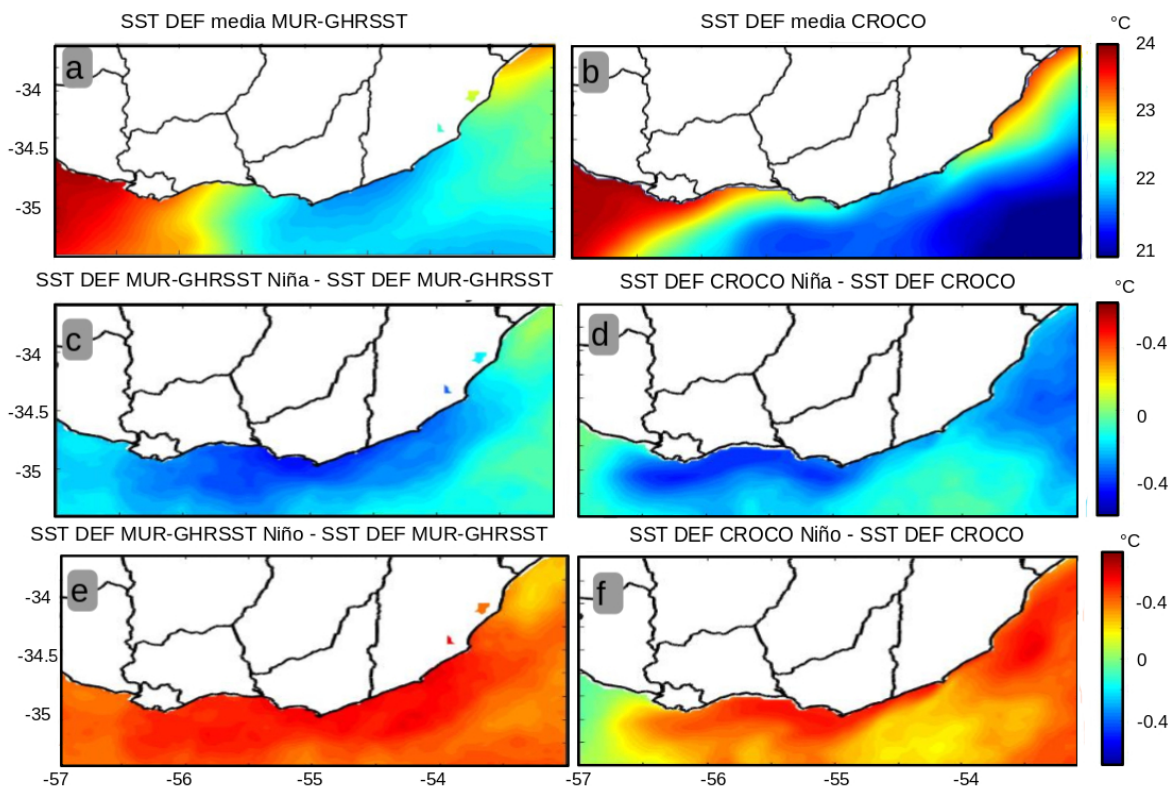


Figura 7: *Composites* de las SST costeras observadas (MUR-GHRSSST) y simuladas (CROCO Z5) para los veranos analizados (a y b), La Niña menos condiciones medias durante el verano (c y d), y el Niño menos condiciones medias durante el verano (e y f), para el período analizado.

La salinidad superficial simulada durante el verano en la región costera también resultó consistente con la literatura (Figura 8). En superficie se observa un marcado gradiente Este – Oeste a lo largo del eje del estuario que es adecuadamente reproducido por el modelo (Piola et al., 2000, Möller et al., 2008; Piola et al., 2008; Guerrero et al., 1997a y b; Guerrero et al., 2010; Figuras 6a-b). El campo de SSS de los reanálisis analizados muestra marcadas diferencias entre ellos y con GLORYS. Particularmente, los reanálisis GOFS y SODA muestran salinidades mayores a 25 cercanos al estuario en las regiones costeras, posiblemente relacionados al tratamiento de las descargas del RdP en sus respectivas simulaciones, y por tanto no fueron

considerados realistas para el área costera y estuarina uruguaya (no se muestran).

La variabilidad diaria de la salinidad simulada durante el verano se encuentra significativamente correlacionada con la obtenida por el reanálisis GLORYS ($r=0.41$ y $r=0.40$ para las ubicaciones costeras oceánica y estuarina, respectivamente), alcanzando CROCO Z5 menores valores absolutos de salinidad (Figura 8 c y d). Es de resaltar que la variabilidad diaria de SSS en la región estuarina resultó también similar a la observada a partir de mediciones de SSS obtenidas durante el verano en Isla de Flores para el período Diciembre 2018 – Febrero 2020 (-55.9, -34.9, ubicada en una localización similar a la ubicación estuarina considerada en este trabajo), donde valores de salinidad menores a 10 fueron registrados comúnmente (Trinchin et al., 2020).

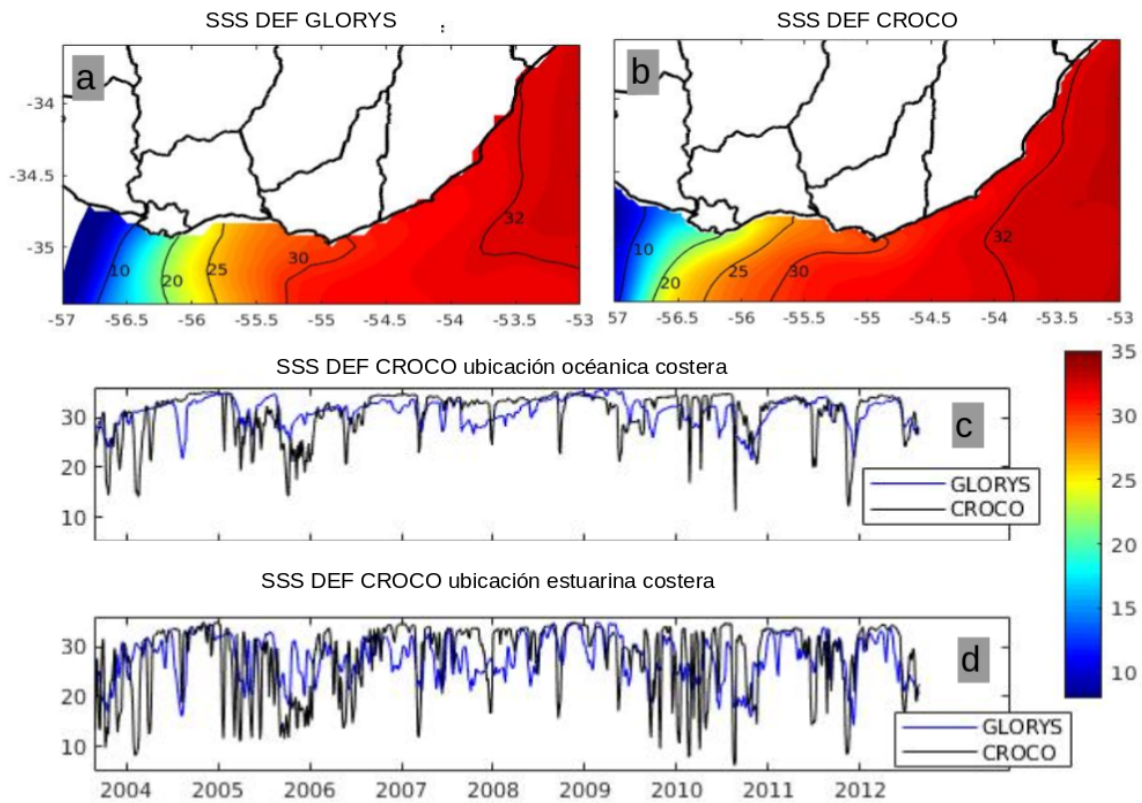


Figura 8: Salinidad superficial (SSS) durante el verano para GLORYS (a) y CROCO Z5 (b). Se marcan las isohalinas 10, 20, 25, 30 y 32. Variabilidad diaria de la SSS simulada y de GLORYS para la ubicación costera oceánica (c) y estuarina (d).

4.4 Identificación de surgencias intensas observadas

Se realizó un Análisis de Máxima Covarianza (MCA por sus siglas en inglés, Wallace et al., 1992) entre las anomalías de SST diarias y la componente zonal de las anomalías de vientos diarios durante verano, para detectar las surgencias intensas que ocurren dentro de la estación directamente relacionadas al viento. Esta técnica estadística está diseñada para encontrar patrones en 2 conjuntos de datos espacio - temporales que expliquen la máxima fracción de la covarianza entre ellos, y puede proporcionar información sobre los procesos físicos que conducen a las variaciones

espaciales y temporales exhibidas en los campos que se analizan. Por lo tanto, la técnica es claramente útil para el propósito, dada la importancia del esfuerzo del viento en la generación de surgencias.

Las anomalías diarias de SST fueron calculadas como la diferencia entre los valores observados y la climatología diaria. Debido a la brevedad del registro, la climatología diaria se suavizó considerando una media móvil de 5 días. Las tendencias en las anomalías fueron eliminadas. El análisis de MCA también se aplicó al campo de SST simulado de CROCO Z5 y la componente zonal de las anomalías diarias del viento en la superficie, para evaluar la capacidad del modelo en simular los procesos de surgencia (Figuras 9 y 10). El primer año de simulación (2003) para ambos casos, fue excluido de manera de permitir el ajuste del modelo.

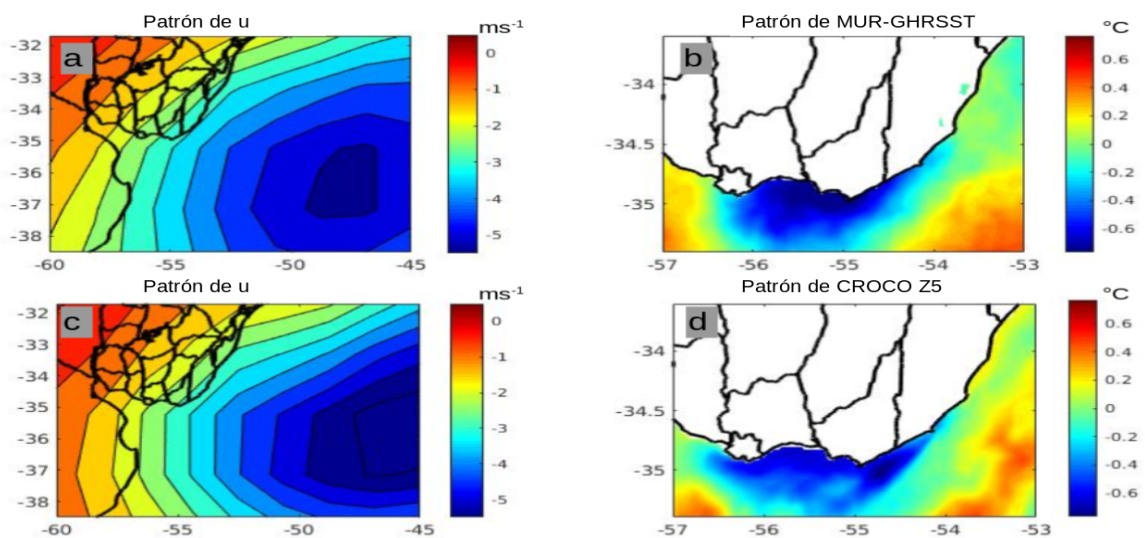


Figura 9: Primer modo de variabilidad para las anomalías de SST observadas y de viento zonal NCEP2 (a y b), y para las anomalías de SST simuladas en CROCO Z5 y de viento zonal NCEP2 (c y d).

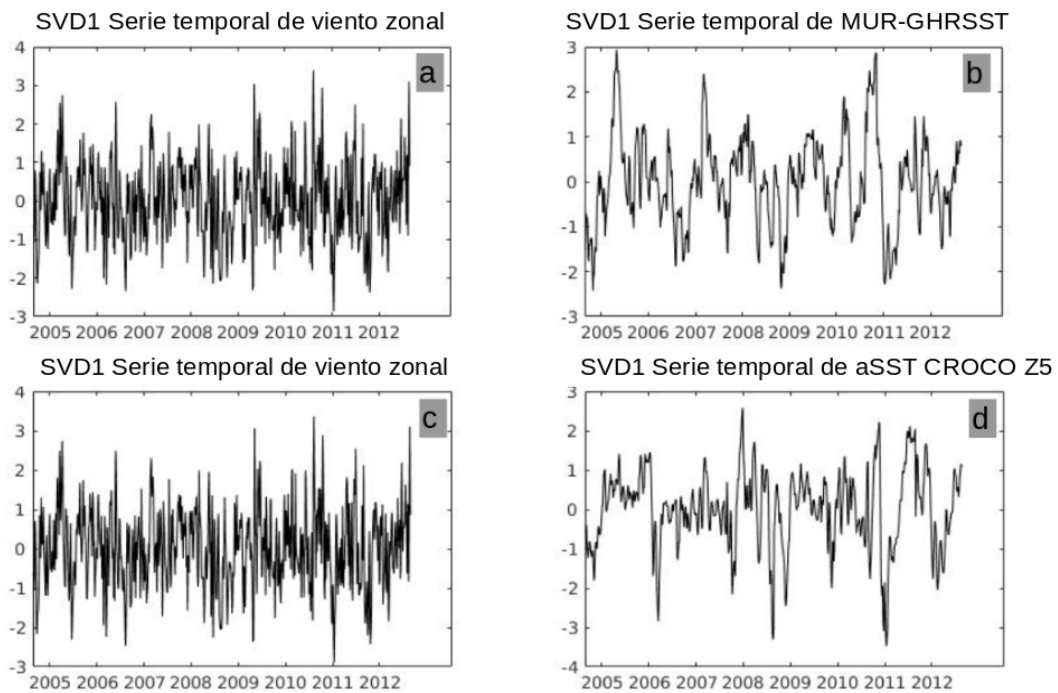


Figura 10: Series de tiempo asociadas con el primer modo del MCA: *a* y *b* vientos zonales y MUR-GHRSSST, *c* y *d* vientos zonales y CROCO Z5 SST.

El primer modo del MCA (SVD1) claramente representa surgencias costeras en ambos, observaciones y simulación del modelo (Figura 9). El primer modo explica el 92% y 91% de la covariabilidad entre los vientos zonales y las anomalías de SST para MUR-GHRSSST y CROCO Z5, respectivamente. Las correlaciones entre las series de tiempo simuladas y observadas para los vientos zonales asociados al primer modo es 0.998. Por lo cual considerando la similitud entre los patrones espaciales, la misma variabilidad del viento estaría siendo capturada en ambas series. En cuanto a la SST, los patrones espaciales resultaron también similares tanto en extensión como en magnitud, pero en los datos observacionales, las mayores anomalías ocurren cercanas a la costa al Oeste de Punta del Este, mientras que en el modelo, los máximos son de menor intensidad y ubicados al Este de Punta del Este. Las series de tiempo de las anomalías de SST asociadas con el primer modo para

MUR-GHRSSST y CROCO Z5 se encuentran significativamente correlacionadas con $r = 0.54$, implicando que el modelo no siempre captura las surgencias observadas. Sin embargo, estos resultados sugieren que en general el modelo es capaz de capturar la variabilidad interanual de los eventos de surgencia en la región costera uruguaya (Figuras 9 y 10). La estructura espacial de las anomalías de SST se asemeja a la surgencia estuarina encontrada por Trinchin et al. (2019), lo cual es esperable considerando que el análisis de MCA fue realizado utilizando los vientos zonales que son paralelos a la costa.

En la siguiente sección, fueron construidos *composites* de diferentes variables simuladas para analizar la estructura oceánica tridimensional asociada a las surgencias intensas observadas. Las fechas de surgencia intensa se seleccionaron considerando el primer modo del análisis de MCA construido con los campos observados (Figura 9) y se definieron como las fechas donde la serie temporal de MUR-GHRSSST fue mayor a +1.5 desviación estándar. Como resultado, se identificaron un total de 55 días de surgencia intensa. Los *composites* se construyeron como el promedio de las variables seleccionadas durante las fechas de surgencia, y se construyeron también para 2 días antes y 2 días después (lag-2, lag0 y lag+2, respectivamente). La última sección del capítulo analiza cómo la variabilidad de viento y descarga continental influyen en los procesos de surgencia utilizando experimentos de sensibilidad descritos en la sección 4.2.

4.5 Estructura de las surgencias

4.5.1 Campos superficiales

Con el fin de describir las surgencias intensas identificadas a partir de datos observacionales en la sección anterior fueron construidos los *composites* de las anomalías simuladas por CROCO Z5 de SST, SSS y velocidad de

corriente zonal (u) (Figuras 11 y 12). En general, la estructura espacial y evolución de los patrones de SST simulados en CROCO Z5 tienen similitudes con aquellos observados. Es decir el enfriamiento se extiende desde La Paloma hasta Montevideo con un máximo en la región estuarina, sin embargo no se extiende tanto hacia mar adentro y el enfriamiento es más débil.

Las anomalías de corrientes costeras son mayores para el día 0 y consistentes con la evolución de las anomalías de SST, sugiriendo advección de agua fría desde la región oceánica hacia la estuarina (entre Montevideo y Punta del Este, Figuras 11 y 12). Al igual que en otras regiones caracterizadas por amplias bahías abiertas durante el transcurso de las surgencias se desarrollan anomalías de corrientes superficiales con dirección Oeste que siguen la costa (Largier 2020).

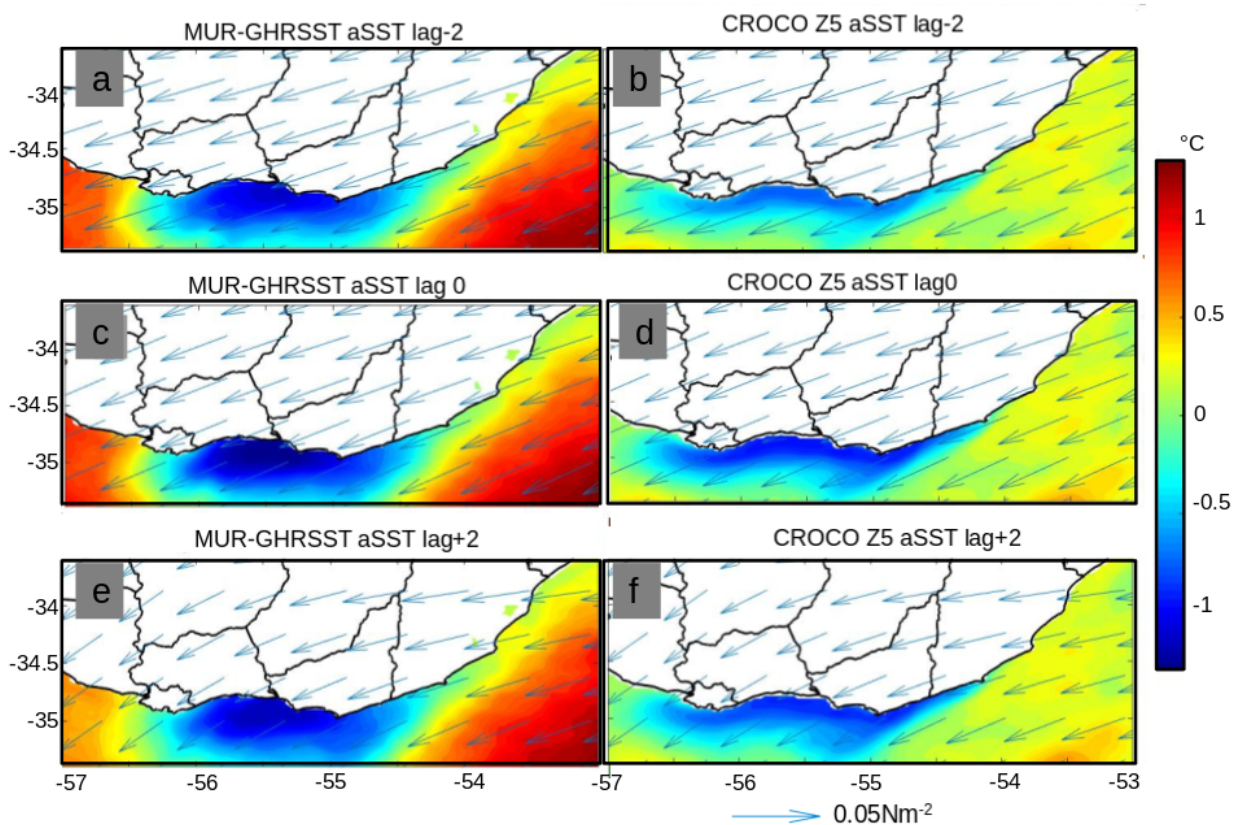


Figura 11: *Composites* de anomalías de SST ($^{\circ}\text{C}$) durante las fechas de surgencia intensa (surgencias observadas para los días de surgencia intensa y lag +2) para MUR-GHRSSST (a,c,e), CROCO Z5 (b,d). Se muestran también los *composites* de anomalías de esfuerzo del viento (Nm^{-2}).

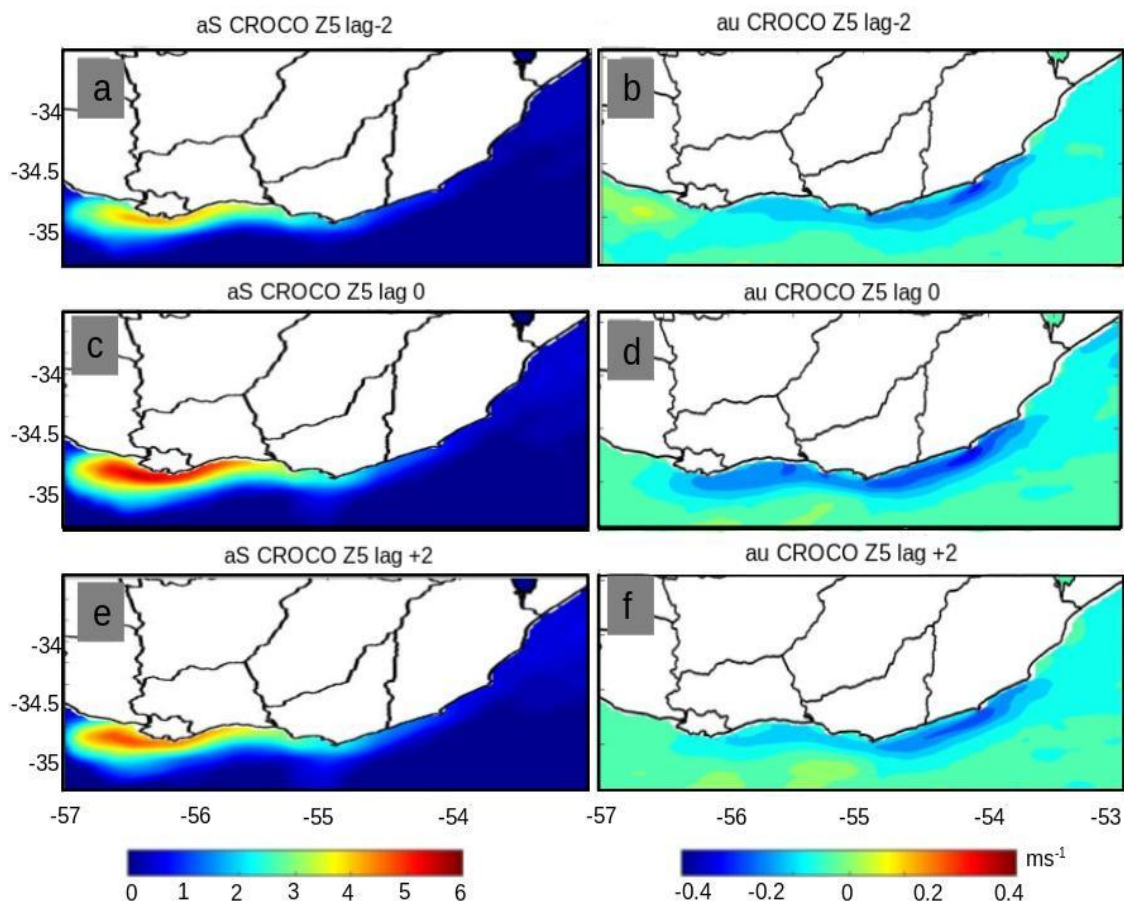


Figura 12: *Composites* de anomalías de SSS (aS,a,c,e) y anomalías de velocidad zonal (ms^{-1} au, b,d,f) durante las fechas de surgencia para CROCO Z5.

Las anomalías de SSS asociadas con fechas de surgencia intensa se muestran en la Figura 12 (a, c, e) y son más intensas en la región costera estuarina, la cual se caracteriza por marcados gradientes de salinidad. No hay estudios previos que muestren los valores de SSS simulados o medidos durante fechas de surgencia intensa sobre la costa uruguaya y por lo tanto no se pueden realizar comparaciones directas. Sin embargo, estos resultados son concordantes con los obtenidos por Meccia y colaboradores (2013): bajo condiciones de vientos idealizados (de dirección Este y Noreste) obtuvieron mayores valores de salinidad en la región costera entre Montevideo y Punta

del Este que los obtenidos en las regiones circundantes y bajo cualquier otra configuración de vientos. Finalmente, los patrones de salinidad simulados de CROCO Z5 son consistentes con surgencias locales, con aguas más saladas ascendiendo desde subsuperficie a superficie, y con procesos de advección lateral de aguas salinas desde el Este por las corrientes anómalas.

4.5.2 Estructura vertical

En esta sección se estudian las características verticales durante las fechas de surgencia intensa. Fueron construidos dos transectos de manera de analizar la estructura vertical de las surgencias simuladas por CROCO. Los transectos se localizan sobre la porción estuarina (Sección A) y sobre la porción oceánica de la costa (Sección B). Las anomalías de temperatura, salinidad, velocidad zonal y vertical (T , S , u y w) fueron analizadas. Todos los transectos fueron realizados para CROCO Z5.

En general, la estructura vertical de las anomalías resultó consistente con agua surgiendo hacia la superficie. Ambos transectos (transectos A y B) muestran aguas más frías y salinas que bajo condiciones sin surgencia en la columna de agua contra la costa, mostrando el transecto A, las mayores anomalías de salinidad (Figuras 13 y 14). La estructura de la temperatura absoluta simulada en la región oceánica es similar a la observada durante una surgencia medida *in situ* durante enero de 2000 obtenida del World Ocean Dataset (Figura 15). A pesar que una comparación directa entre ambos casos no es posible (dado que ocurrieron en diferentes años), la extensión espacial y el patrón de temperaturas entre la costa y mar adentro es similar.

Los patrones de las anomalías verticales de salinidad muestran que en el transecto A, aguas salinas asociadas con la surgencia se extienden en superficie más de 30 km mar adentro. Las elevadas anomalías de salinidad observadas en el transecto A cercanas a la costa, positivas en toda la

columna y con valores máximos cercanos al fondo, son consistentes con los patrones de anomalías encontrados por Meccia y colaboradores (2013) durante una simulación con vientos idealizados favorables a surgencias. En el transecto B, aguas salinas asociadas con las surgencias se extienden aproximadamente 20 km mar adentro, lo cual es concordante con las anomalías de SSS simuladas.

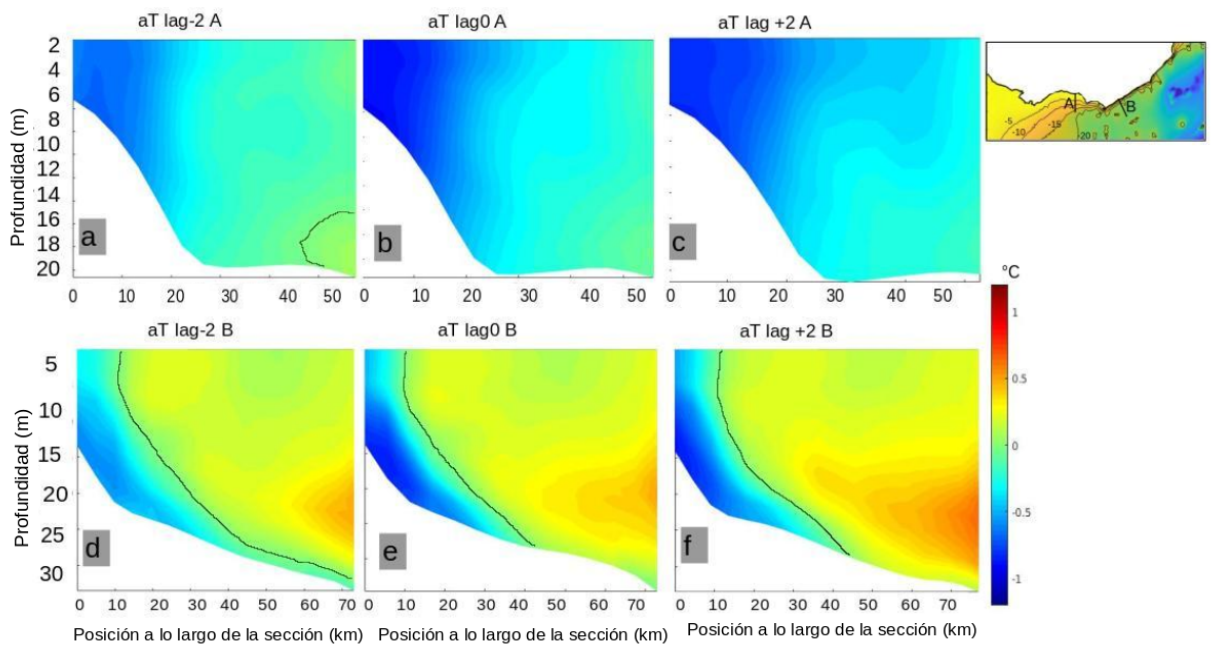


Figura 13: Estructura de las anomalías de Temperatura (aT , $^{\circ}\text{C}$) durante las fechas de surgencia intensas para CROCO Z5. Los paneles superiores se corresponden con el transecto A, estuarino: a) lag-2, b) lag0, c) lag+2. Los paneles inferiores se corresponden con el transecto B, oceánico: d) lag-2, e) lag0, f) lag+2. La figura superior derecha se corresponde con los transectos considerados. La línea negra indica el contorno cero.

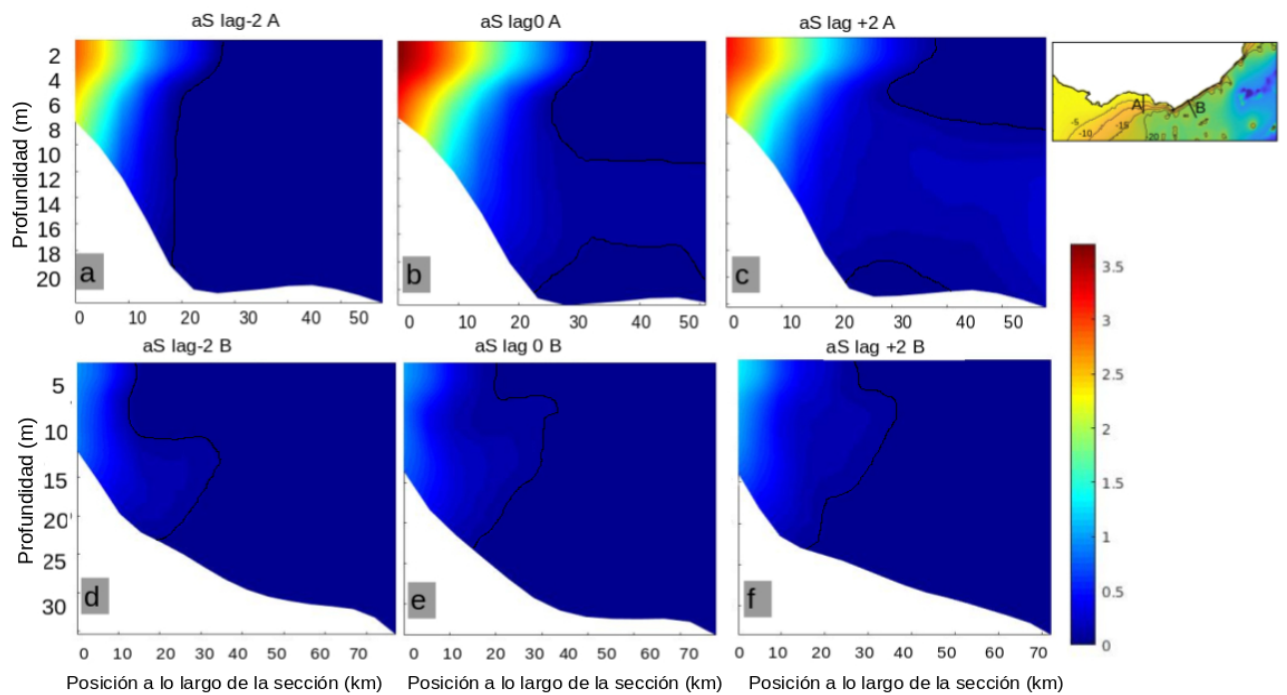


Figura 14: Análoga a Figura 13, pero para las anomalías de Salinidad (aS).
Resultados para CROCO Z5.

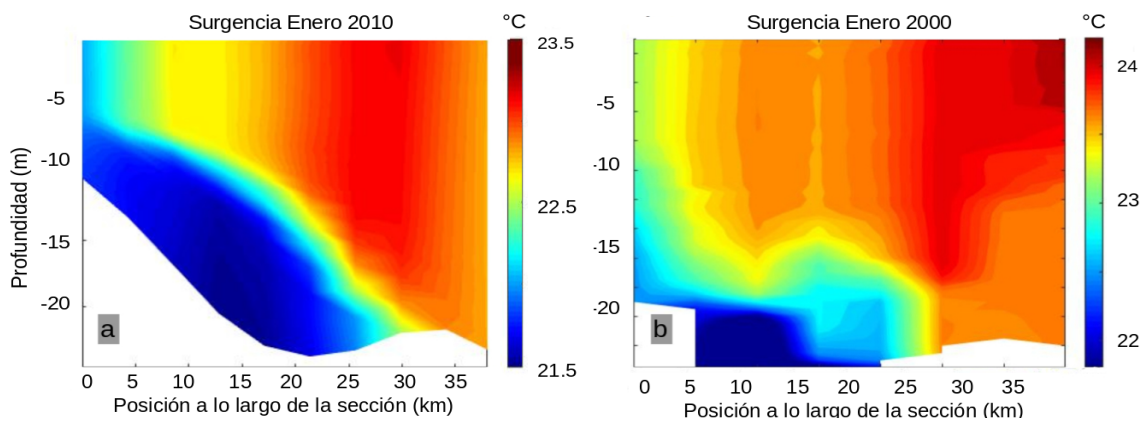


Figura 15: Distribución de Temperatura vertical (T , °C) para dos surgencias distintas ocurridas durante enero en transectos localizados en la costa oceánica uruguaya. Simulada por CROCO Z5 (a) y medida *in situ*, obtenida del WOD (b). Notar las distintas escalas de temperatura utilizadas.

Las anomalías de velocidad zonal para ambos transectos son hacia el Oeste en toda la columna con valores máximos en superficie (Figura 16). El transecto B desarrolló las mayores corrientes con anomalías positivas de 0.3 ms^{-1} durante el día 0 de las fechas de surgencia identificadas. Las corrientes quedan atrapadas contra la costa extendiéndose hasta 30 km mar adentro en el transecto A y hasta 20 km mar adentro en el transecto B, coincidiendo con las escalas de salinidad mencionadas anteriormente. Estas escalas espaciales definen la extensión mar adentro de las surgencias en ambas regiones.

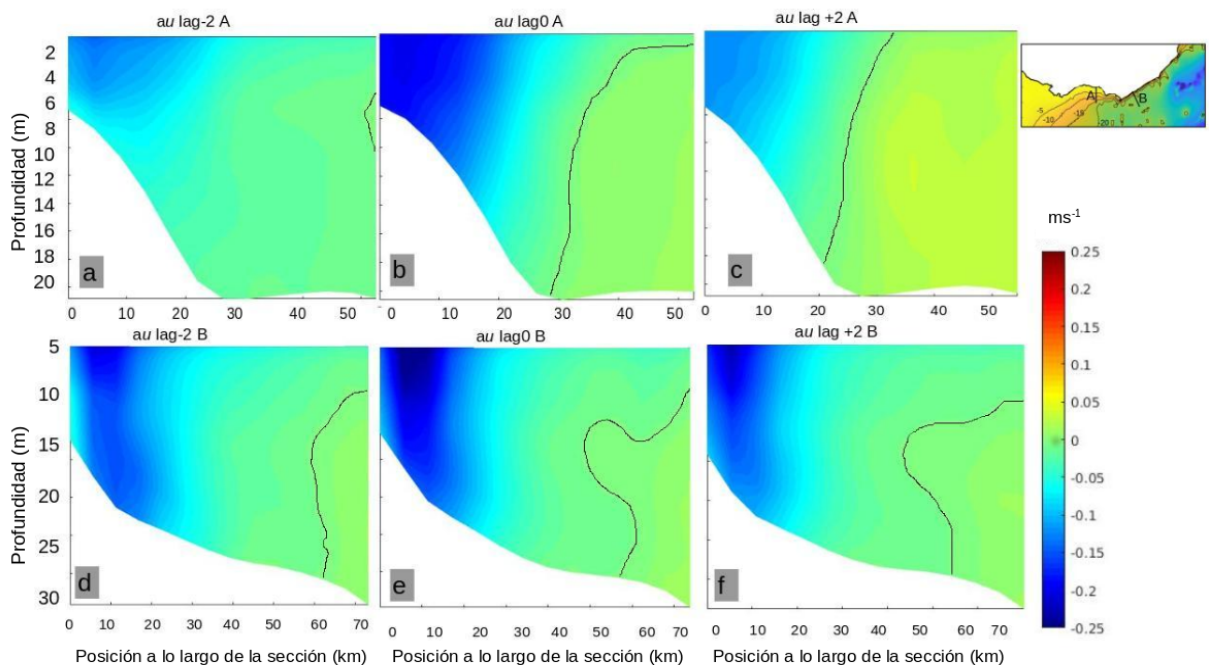


Figura 16: Análoga a la Figura 9, pero para anomalías de velocidad zonal (au, m/s). Resultados para CROCO Z5.

Para finalizar la descripción de la estructura vertical de las surgencias, analizamos las anomalías de velocidad vertical. Velocidades verticales positivas simuladas en las regiones costeras durante las surgencias presentan valores de hasta $2 \times 10^{-2} \text{ cms}^{-1}$ (valores no mostrados), los cuales resultan

concordantes con las velocidades verticales encontradas durante eventos de surgencia en otras regiones (Johnson, 1977; Kowalewski & Ostrowski; 2005; Steinfekdt et al., 2015; Xie et al., 2017). Ambos transectos (A y B) muestran anomalías de velocidad vertical positivas durante las fechas de surgencia intensa cercanas al fondo, en el área donde la pendiente es mayor. Las anomalías son más intensas en lag -2, mientras que las anomalías de SST resultaron mayores en lag 0 y lag +2, indicando un retraso de las parcelas de agua para ascender desde el fondo y alcanzar la superficie (Figura 17). Este resultado es consistente con Trinchin et al. (2019) quienes encontraron un retraso entre el forzante ocasionado por el viento y la máxima manifestación en superficie. Adicionalmente, el Transecto B muestra anomalías positivas hasta 15 km mar adentro y luego anomalías negativas, indicando hundimientos de agua; este patrón podría explicar la extensión *offshore* limitada de las anomalías de SST simuladas para la región oceánica. Sin embargo este proceso de hundimiento (o al menos su intensidad) es probablemente dependiente del modelo y es un tema de estudio, debido a que los patrones de anomalías de MUR-GHRSSST muestran una extensión mar adentro mayor de las anomalías de SST simuladas como se observa en la Figura 11.

La desviación estándar fue computada para las anomalías de velocidad vertical en lag 0. Ambos transectos registraron elevados valores de desvío estándar en el centro del región de surgencia (hasta $2.9 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$ para el transecto estuarino y $6 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$ para el oceánico, no mostrados), indicando diferencias en la intensidad y localización de la surgencia durante las fechas de surgencia intensas. Esto es esperable dado que varias fechas de surgencia correspondientes a un mismo evento pueden ser seleccionadas con el análisis de MCA. A lo largo de la evolución de una surgencia, se espera que varíen las velocidades verticales y su ubicación exacta.

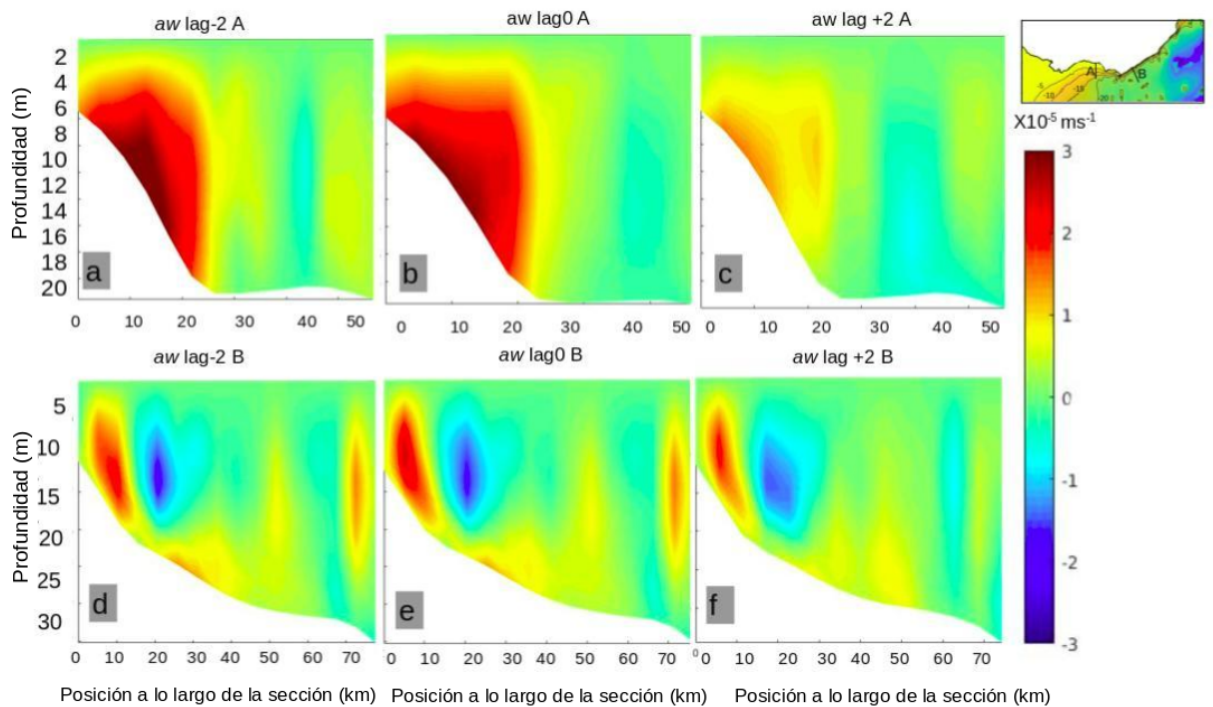


Figura 17: Estructura de las anomalías de velocidad vertical (aw , ms^{-1}) durante eventos de surgencia para el transecto estuarino, A (a-c) y B (d-e).

Resultados para CROCO Z5.

4.6 Rol de la variabilidad de viento y descarga continental sobre el desarrollo de surgencias intensas

A continuación analizamos los experimentos CROCO *dc* (descarga climatológica de agua dulce), CROCO *wc* (vientos climatológicos) y CROCO *wc+dc* (descargas y vientos climatológicos) para determinar el impacto de la variabilidad diaria de vientos y descarga en la generación de surgencias. Para ello, computamos los *composites* de SST durante las fechas de surgencia intensa identificadas en la sección 4.4 utilizando las salidas de los distintos experimentos. Los resultados muestran claramente que el viento es el principal forzante en la generación de surgencias, de manera que en CROCO *dc* se recupera prácticamente el mismo patrón e intensidad de anomalías de SST que en CROCO Z5 (comparar Figura 18a con Figura 11d). Al imponer

variabilidad interanual en las descargas diarias bajo condiciones de vientos climatológicos se obtiene prácticamente el mismo resultado que al considerar la climatología en ambos campos, esto implica que el modelo no es capaz de representar las surgencias observadas bajo estas condiciones (comparar Figuras 18b y 18c).

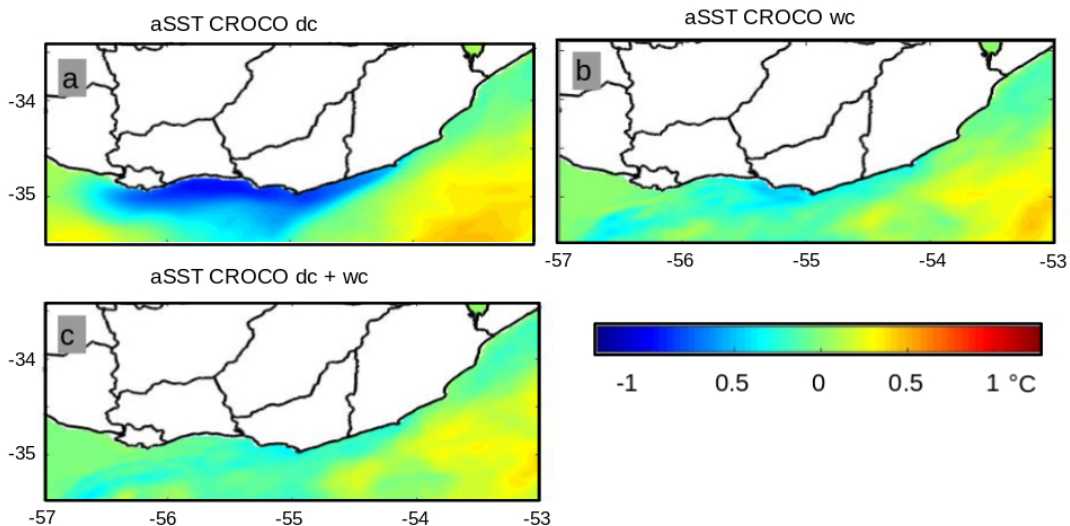


Figura 18: *Composites* de anomalías de SST ($^{\circ}\text{C}$) durante eventos de surgencia para (a) CROCO *dc*, (b) CROCO *wc* y (c) CROCO *dc+wc*.

A partir del análisis de la distribución vertical de densidad durante las surgencias intensas en los transectos estuarino (A) y oceánico (B), se puede observar que al forzar el modelo con vientos y descargas diarias interanuales (CROCO Z5), el perfil vertical resultó consistente con la presencia de agua mezclada cerca de la costa. Los experimentos de sensibilidad, por su parte muestran que al remover la variabilidad interanual la estabilidad de la columna de agua aumenta, siendo más evidente este efecto en el transecto estuarino y cuando el modelo es forzado con vientos climatológicos y descarga variable (Figura 19).

De las 55 fechas de surgencia identificadas, 40 fueron registradas durante la fase fría de ENOS, consistente con Trinchin et al. (2019). Debido a que La Niña induce vientos del este anómalamente intensos en la región de interés, los vientos medios (del este) utilizados en la simulación CROCO *wc* resultaron más débiles que los vientos medios que caracterizan todos los eventos de surgencia. Así en el experimento CROCO *wc*, adicionalmente a la acción directa de los vientos climatológicos disminuyendo la generación de surgencia local, la advección de agua densa (que habría ascendido con la surgencia) desde la región oceánica a la estuarina también disminuye, contribuyendo al gran gradiente vertical de densidad simulado en este caso (Figura 19). Estos experimentos demuestran el rol fundamental de los vientos en la generación de surgencias y el rol secundario de la descarga del RdP.

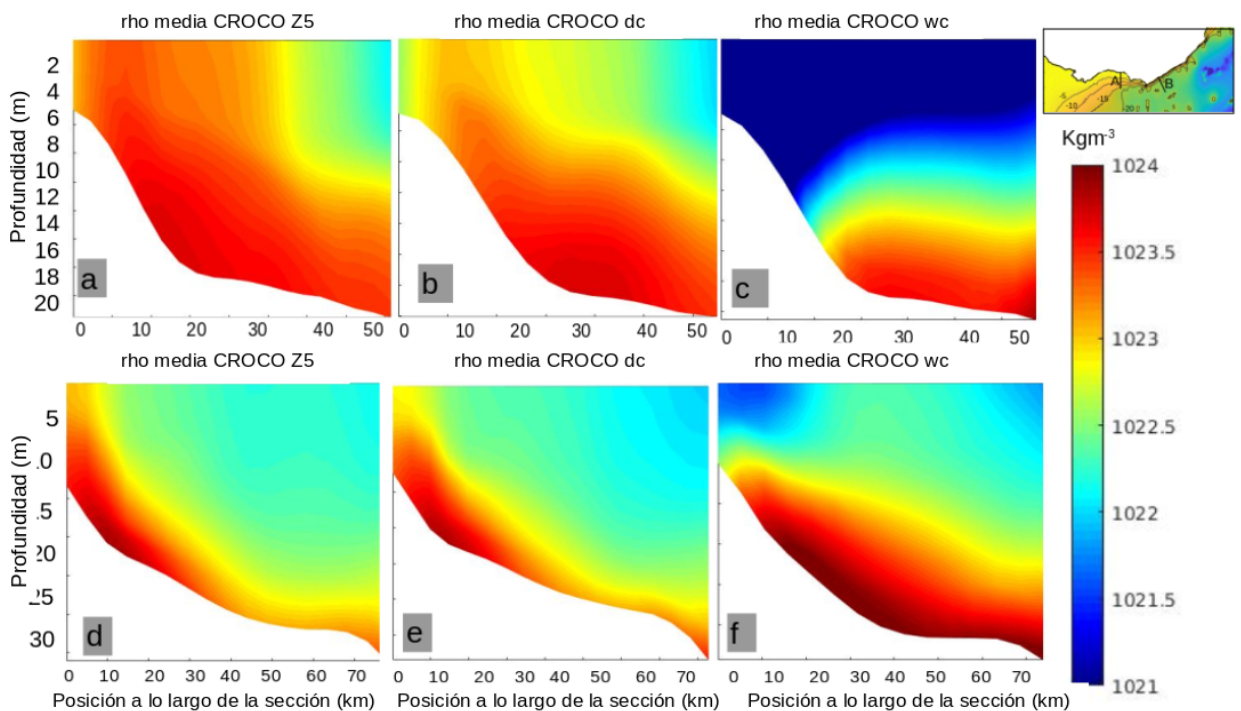


Figura 19: Densidad vertical promedio (ρ) para el transecto A estuarino (a-c) y densidad vertical promedio para el transecto oceánico B (d-f) para los experimentos CROCO Z5, CROCO *dc* y CROCO *wc*.

Como otro ejemplo de los roles relativos de la variabilidad de vientos y descargas, fueron analizadas las fechas de surgencias durante La Niña. Para ello, se construyeron *composites* de las fechas de surgencia intensa durante La Niña y se compararon con los *composites* durante las mismas fechas de surgencia para los distintos experimentos (Figura 20). De manera de facilitar la comparación entre los experimentos, se computaron los promedios de las anomalías de SST durante las fechas de surgencia intensas dentro de una caja ubicada en la región estuarina. La simulación de control (CROCO Z5) fue capaz de capturar de manera adecuada la estructura espacial e intensidad de las surgencias con las mayores anomalías de SST en la región estuarina (dentro de la caja, las anomalías simuladas en promedio fueron de $-1.32\text{ }^{\circ}\text{C}$ y las observadas de $-1.43\text{ }^{\circ}\text{C}$ Figuras 20 a y 20 b). Adicionalmente, la simulación con descargas climatológicas (CROCO *dc*) muestra un patrón similar con una intensidad menor ($-1.23\text{ }^{\circ}\text{C}$ dentro de la caja, Figura 20c), lo que es esperable debido a que en esta última simulación la descarga es mayor que en CROCO Z5 durante los años en que ocurrió La Niña. Las descargas más intensas aumentan la estabilidad vertical de la columna de agua, dificultando a los vientos romper el gradiente de densidad y mezclar el agua. La simulación con vientos climatológicos ($-0.24\text{ }^{\circ}\text{C}$ dentro de la caja, CROCO *wc*) muestran un débil enfriamiento en una región limitada a la zona costera al Oeste de Punta del Este, posiblemente relacionada a la disminución de la estabilidad de la columna debido a las menores descargas que ocurren durante los eventos La Niña. Finalmente, el experimento con vientos y descargas climatológicas, no muestra prácticamente anomalías de SST en la región de surgencia ($-0.08\text{ }^{\circ}\text{C}$ dentro de la caja, Figura 20 e).

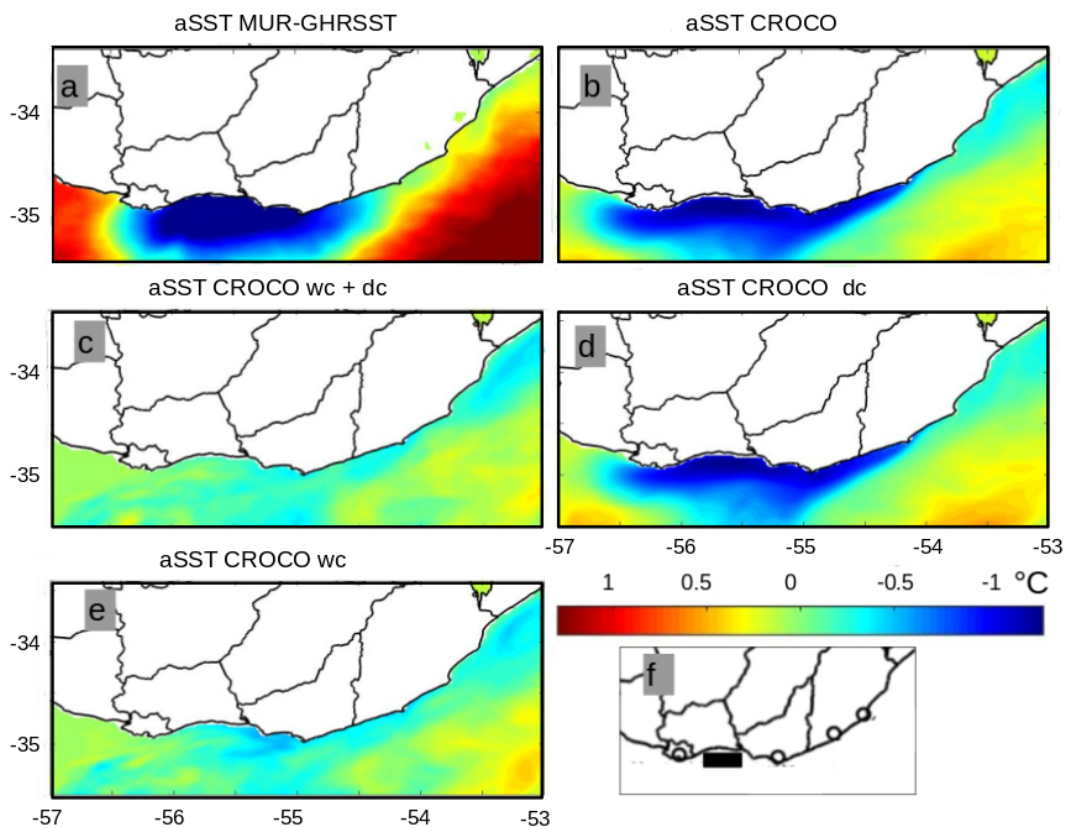


Figura 20: *Composites* de anomalías de SST ($^{\circ}\text{C}$) durante las fechas de surgencias en años La Niña para (a) observaciones (MUR-GHRSSST), (b) CROCO Z5, (c) CROCO *dc*, (d) CROCO *wc* y (e) CROCO *dc+wc*. La caja donde las anomalías promedio de SST fueron calculadas en todos los experimentos se muestra en (f).

4.7 Comentarios finales y conclusiones

Los resultados de este capítulo representan una contribución a la comprensión de la estructura, variabilidad y factores controladores de las surgencias que ocurren en verano sobre la costa uruguaya, utilizando por primera vez una combinación de aproximaciones observacionales y numéricas. Para ello, fueron realizadas simulaciones numéricas con un modelo oceánico regional forzado con condiciones laterales y de borde

realistas para el período 2003 - 2012. El modelo reprodujo las condiciones medias, interanuales y la variabilidad diaria durante el verano, permitiendo el estudio de la estructura tridimensional de las surgencias costeras durante el verano. Adicionalmente experimentos realizados removiendo la variabilidad en los forzantes vientos y descargas de agua dulce, permitieron separar los roles de la descarga del RdP y los vientos en la dinámica de las surgencias.

A escala de tiempo estacional, el análisis de las observaciones junto con las simulaciones permitió identificar la surgencia climatológica que ocurre principalmente a lo largo de la costa oceánica uruguaya, con una intensidad que varía interanualmente, de manera que se vuelve más intensa (débil) durante los años en que ocurre La Niña (El Niño).

A escala de tiempo subestacional, fueron identificadas las fechas en que las surgencias más intensas ocurrieron sobre la región costera, utilizando un Análisis de Máxima Covarianza. Se observó que a diferencia de la surgencia climatológica, la surgencia subestacional presenta las mayores anomalías de SST en la porción estuarina de la costa uruguaya con sus valores máximos entre Montevideo y Punta del Este. Utilizando las salidas del modelo numérico CROCO fueron estudiadas las anomalías de temperatura, salinidad y velocidades horizontales y verticales, de manera de caracterizar por primera vez la estructura tridimensional de las surgencias en esta región.

Este estudio consideró vientos y descargas realistas en la simulación, los cuales se identifican como los principales controladores de las surgencias en el área (Framiñan et al., 1999; Pimenta et al., 2008; Simionato et al., 2010; Trinchin et al., 2019). De manera de contribuir a la comprensión de los roles de viento y descarga de agua continental en la generación de surgencias realizamos experimentos de sensibilidad. Fue demostrado que los vientos son el principal factor controlador, con una contribución secundaria de la descarga del río. Durante los períodos La Niña, la disminución de la descarga del RdP y

las anomalías de los vientos del Este a lo largo de la costa favorecen el desarrollo de surgencias intensas con anomalías máximas de SST entre Montevideo y Punta del Este. De esta manera, los resultados obtenidos refuerzan la importancia de la modelación numérica en el estudio de los impulsores de las surgencias costeras y permitieron verificar la hipótesis planteada acerca de los factores generadores de surgencias en la costa uruguaya.

Finalmente, es reconocido que además de las surgencias generadas por el viento, otros mecanismos físicos pueden promover o incluso producir afloramientos (i.e., topografía; Song et al., 2004; Gan et al., 2007; Chen et al., 2013; Wang et al., 2013). En este sentido, futuros estudios considerando experimentos numéricos de modelado idealizados que modifiquen la pendiente y orientación de la costa uruguaya, serían necesarias para comprender el papel de la topografía en la dinámica de surgencia a lo largo de la costa uruguaya.

5. APROXIMACIÓN LAGRANGIANA AL ESTUDIO DE LAS SURGENCIAS DE VERANO SOBRE LA COSTA URUGUAYA ¹

¹Publicación asociada: de Mello, C., Barreiro, M., Hernández-García., E., Trinchin, R., & Manta, G. (2022). A Lagrangian study of summer upwelling along the Uruguayan coast. *Continental Shelf Research. Minor review / Accepted.*

5.1 Introducción al capítulo y objetivos

En el capítulo anterior se describió por primera vez la estructura espacial, temporal, tridimensional y los factores controladores de las surgencias que ocurren durante el verano sobre la costa uruguaya. Los procesos de transporte, dispersión y mezcla de aguas costeras relacionadas a estas surgencias también son procesos de crucial interés debido a la importancia económica y ecológica de estas áreas. En este sentido, a pesar del creciente interés sobre los procesos físicos que tienen lugar en el océano costero, estudios que involucran el análisis de las trayectorias de partículas de agua advectadas con el flujo son aún muy incipientes y no han sido realizados previamente en aguas uruguayas.

Con el fin de analizar por primera vez las condiciones hidrodinámicas en la zona costera uruguaya desde un punto de vista Lagrangiano durante los eventos de surgencia costera que ocurren en verano, se evaluó la actividad de mezcla mediante el cómputo de los Exponentes de Lyapunov de Tamaño Finito (FSLE) a partir del campo de velocidades superficial obtenido de salidas del modelo numérico CROCO. Adicionalmente, los patrones de transporte durante eventos particulares de surgencia fueron analizados mediante la identificación de las Estructuras Coherentes Lagrangianas (LCS) y la simulación del transporte de partículas Lagrangianas obtenidas de un modelo basado en individuos (ICHTHYOP). Finalmente, es importante mencionar que debido a que fue la primera aplicación del método de FSLE en el área, la sensibilidad de la técnica a diferentes configuraciones de los parámetros fue también discutida.

Este capítulo se organiza de la siguiente manera; la sección 5.2 describe y valida brevemente el modelo y sus salidas así como el análisis realizado para identificar las fechas en que los eventos de surgencia más intensos fueron simulados. La sección 5.3 describe las aproximaciones Lagrangianas utilizadas en este estudio. La sección 5.4 presenta y discute los resultados Lagrangianos y compara las LCS obtenidas con la distribución de temperatura, clorofila a y la dispersión de partículas liberadas en dos ubicaciones costeras. Finalmente, la sección 5.5 resume las conclusiones del capítulo y provee los comentarios finales.

5.2 Modelo numérico

5.2.1 Configuración del modelo

De manera similar a lo realizado en el Capítulo 4, se simularon las condiciones oceanográficas en el área marina, estuarina y costera uruguaya utilizando el modelo numérico CROCO con los mismos forzantes diarios interanuales (vientos diarios provenientes del reanálisis NCEP2 y descargas diarias sobre el RdP), resoluciones y parámetros que los utilizados allí (Figura 21).

En este capítulo se incluyó además como forzante a las mareas, lo que no produjo cambios significativos en la simulación de las variables analizadas. No obstante al ser considerada más realista por considerar este forzante adicional se utilizó esta nueva simulación para el presente análisis.

Al igual que en el capítulo 4, se corrió una simulación de *spin up* de 5 años de duración para luego realizar una simulación interanual desde el 1 de enero de 2003 al 31 de diciembre de 2012. Los campos medios e instantáneos fueron guardados cada día.

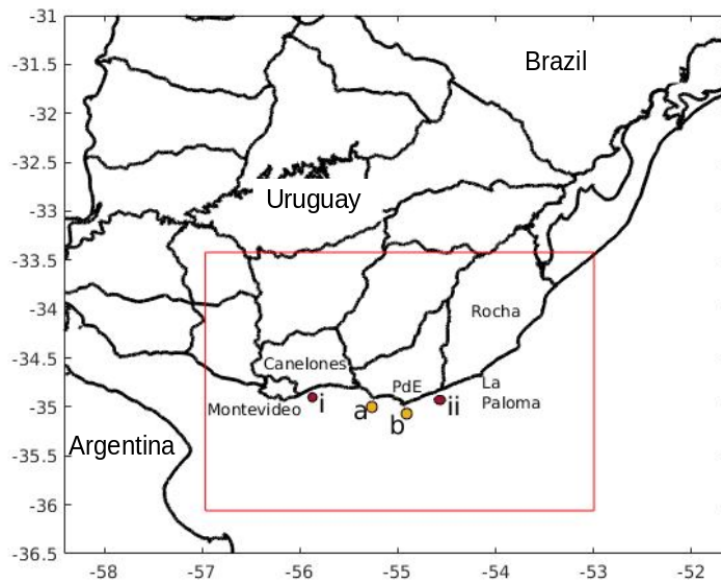


Figura 21: Área de estudio donde se configuró el modelo CROCO en su configuración interanual, incluyendo las forzantes de mareas. El rectángulo interno se corresponde con el área donde la técnica de los Exponentes de Lyapunov fue aplicada. Las ubicaciones *i* e *ii* marcan las ubicaciones donde se consideraron los campos de temperatura y salinidad superficial para comparar el modelo con observaciones; mientras que *a* y *b* son las ubicaciones donde fueron liberadas partículas sintéticas en el modelo ICHTHYOP.

La configuración interanual del modelo utilizando mareas generó una representación satisfactoria de las corrientes regionales costeras, así como de la distribución de salinidad y temperatura. Los resultados del modelo son muy similares a los de la configuración interanual realizada en el Capítulo 4 sin incluir mareas. Las Figuras 22 y 23 muestran las comparaciones superficiales de los campos medios e interanuales de la salinidad y temperatura superficial (SSS y SST) entre CROCO y el reanálisis GLORYS.

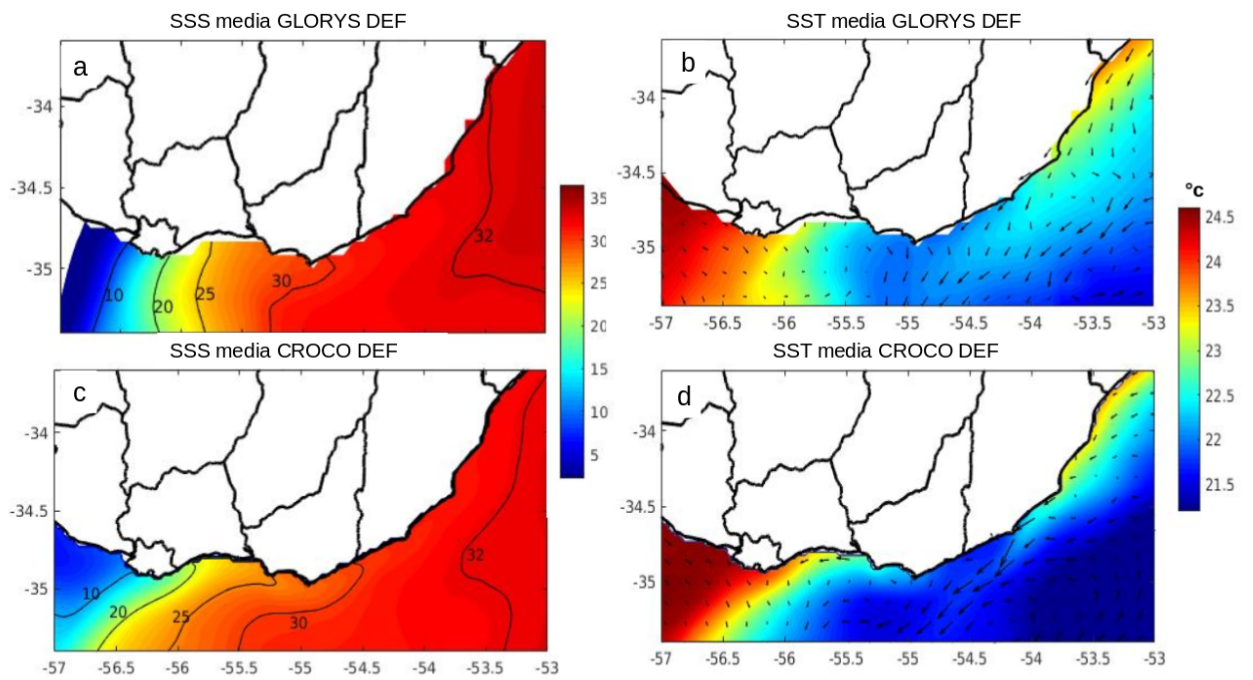


Figura 22: SSS media registrada por el reanálisis GLORYS y simulada por CROCO (A y B). SST (°C) media registrada por el reanálisis GLORYS y simulada por CROCO, se muestran también los vectores de velocidad superficial registrados por GLORYS y simulados por CROCO (B y D).

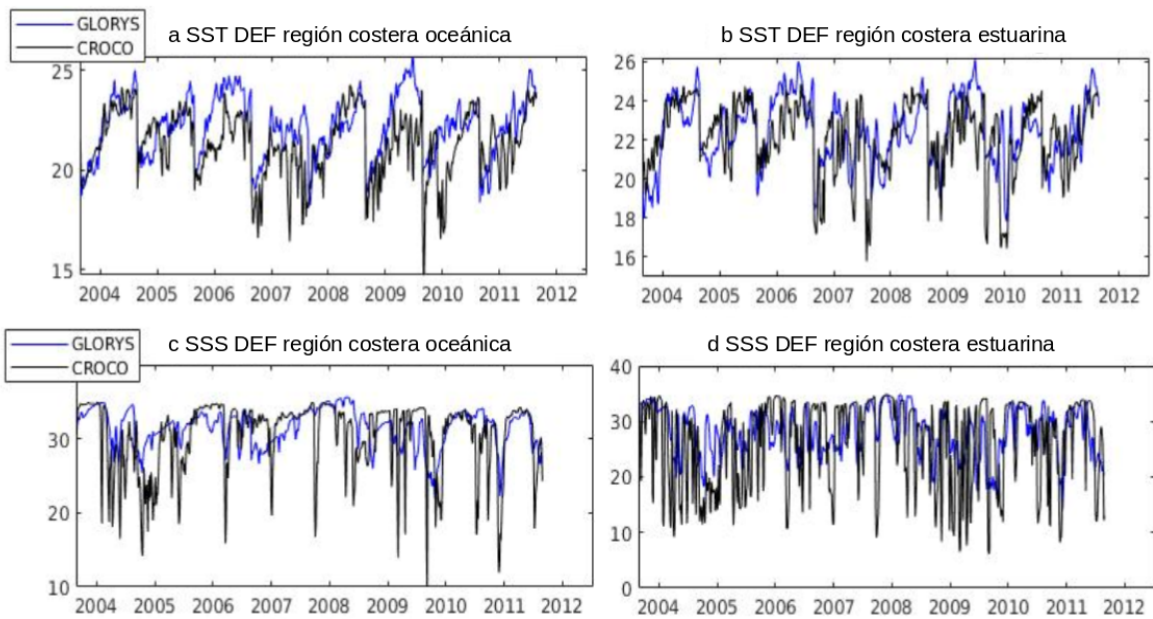


Figura 23: Evolución superficial de la SST y SSS diaria durante el verano para la ubicación estuarina (a y c) y la ubicación oceánica (b y d) para el reanálisis GLORYS y simulada por CROCO.

5.2.2 Identificación de las fechas de surgencia intensa simuladas

Para identificar las fechas en que el modelo simuló surgencias intensas, fue seguida una técnica estadística similar a la del Capítulo 4, pero aplicada a las anomalías de SST simuladas. En el capítulo anterior se identificaron las fechas de surgencia a partir de las anomalías de SST observadas de acuerdo a MUR-GHRSSST y se evaluó cómo el modelo reproducía las surgencias en las fechas en que fueron observadas. En este capítulo y en el próximo se trabaja directamente con las fechas en que las surgencias fueron detectadas por el modelo. Las fechas identificadas utilizando los datos observados y los simulados resultaron similares, pero con algunas diferencias en la extensión, inicio y finalización de cada evento de surgencia intensa. Para el tipo de aproximación Lagrangiana en que trabajamos directamente con las variables simuladas para evaluar los procesos de transporte y turbulencia, se consideró

más apropiado utilizar las fechas de surgencias directamente detectadas por la simulación.

De esta manera, se realizó un MCA entre la media diaria de las anomalías de SST simuladas y la componente zonal de las anomalías de vientos diarios provenientes del reanálisis NCEP2. Al igual que en el Capítulo 4, las anomalías se computaron como la diferencia entre los valores simulados y la climatología diaria; la climatología diaria fue suavizada considerando una media móvil de 5 días; la tendencia fue removida de las anomalías, y el primer año de simulación 2003, fue excluido del análisis para permitir el ajuste del modelo. Consistente con los resultados obtenidos en el capítulo anterior, la Figura 24 muestra que el primer modo del MCA aplicado a la simulación representa surgencias costeras con amplitudes máximas entre Montevideo y La Paloma (Figura 24 b). Adicionalmente para la identificación de las fechas de surgencia intensa se aplicó un nivel de restricción menor al utilizado en el Capítulo 4. Es decir fueron consideradas como fechas de surgencia intensa aquellas en que la serie de tiempo de las anomalías de SST simuladas (Figura 24 d) resultaron mayores a +1.0 desvío estándar. Así fueron identificados 111 días de surgencia intensa, agrupados en 14 eventos (Tabla 1).

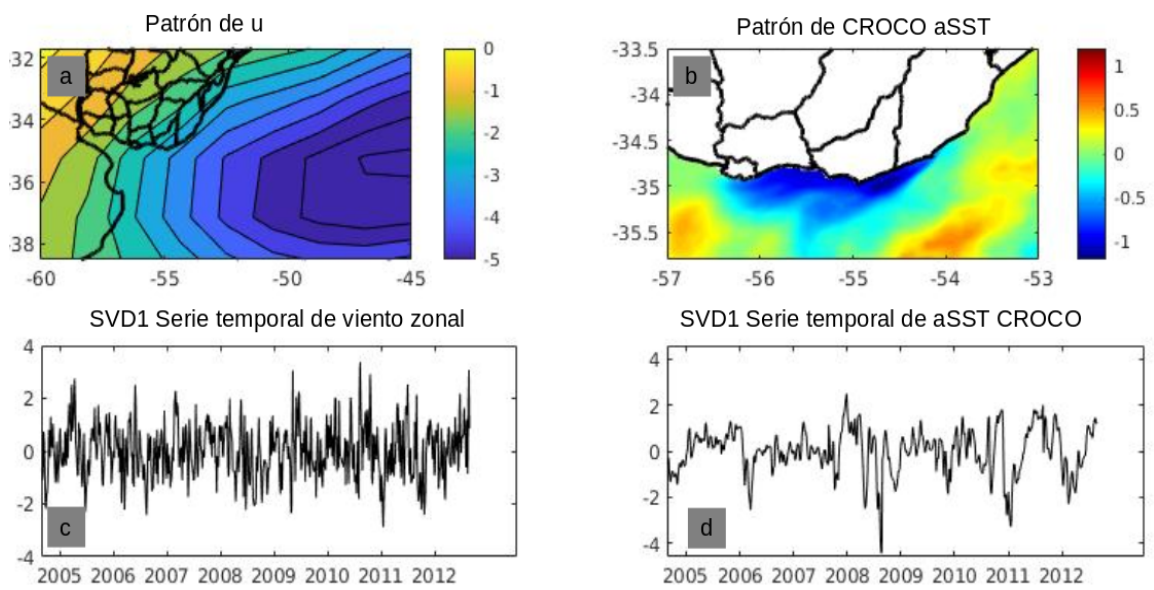


Figura 24: Primer modo del análisis de SVD entre las anomalías de vientos zonales (A) y de SST simuladas (B). Series de tiempo asociadas con el primer modo: viento zonal (C) y CROCO SST (D).

Tabla 1: Fechas de los eventos de surgencia simulados

| Intense Upwelling dates |
|----------------------------|
| 11-13 Dec 2004 |
| 17-19 Dec 2004 |
| 9-10 J an 2006 |
| 15-23 J an 2006 |
| 11-16 Dec 2007 |
| 28 J an - 03 Feb 2008 |
| 20-28 Feb 2008 |
| 16-27 Dec 2008 |
| 21-26 Dec 2009 |
| 03-08 Dec 2010 |
| 25 Dec 2010 - 25 J an 2011 |
| 02-05 J an 2012 |
| 12-16 J an 2012 |
| 21-26 J an 2012 |

5.3 Aproximación Lagrangiana

5.3.1. Técnica de FSLE aplicada

En esta sección, describimos la implementación de la técnica Lagrangiana de los Exponentes de Lyapunov, FSLE (Aurell et al., 1997) utilizada en este capítulo para cuantificar los procesos de mezcla y transporte horizontal. Fueron computados los Exponentes de Lyapunov para el período de verano (Diciembre – Enero – Febrero) entre 2004 y 2012. Para el cálculo solamente se consideraron las velocidades horizontales superficiales del modelo numérico CROCO, de esta manera no fueron considerados los desplazamientos verticales en las capas superficiales. Esto se justifica debido a las pequeñas velocidades verticales (hasta 17 m día^{-1} en las regiones de surgencia intensa) y a los pequeños tiempos de integración utilizados.

La aplicación del algoritmo de FSLE requiere configurar los parámetros que definen las separaciones inicial y final entre partículas, δ_i y δ_f , respectivamente, considerando que la técnica depende de manera crítica de la elección de estos parámetros. En general, debe ser seleccionada una combinación adecuada de ellos. La distancia inicial afecta la visibilidad de los detalles (a menor δ_i , mayores detalles). Las estructuras que alcanzan a ser detectadas dependen de la separación final, si δ_f es seleccionado mayor que la separación alcanzable por las partículas advectadas dentro del dominio espacial finito de las velocidades del modelo, entonces no se van a detectar estructuras. Considerando la falta de estudios previos que computen los FSLE sobre la costa uruguaya, se presenta un análisis de sensibilidad frente a los parámetros δ_i y δ_f . Para valores de δ_i y δ_f adecuadamente seleccionados, el campo de los FSLE se organiza en un conjunto de estructuras filamentosas de valores altos sobre un fondo de valores bajos del exponente. Nos

mantenemos siempre en este régimen, considerado el adecuado para identificar las estructuras filamentosas como aproximaciones a las LCS que organizan el transporte de fluidos (d'Ovidio et al, 2009; Tew Kai et al., 2009; Hernandez-Carrasco et al, 2011). Adicionalmente, nuestra elección de parámetros evita la aparición de discontinuidades y problemas relacionados con la dependencia del tiempo de integración (Karrasch y Haller, 2013).

Una vez seleccionados los parámetros, los FSLE fueron computados liberando un ensamble de partículas sintéticas sobre la grilla de FSLE y siguiendo la evolución de su distancia relativa. Para cada nodo de grilla, 5 partículas fueron inicializadas con una partícula central ubicada sobre el nodo de la grilla y las otras 4 rodeándola a una distancia δ_i a lo largo de las direcciones latitudinal y longitudinal. Esta elección permite considerar las diferentes intensidades de dispersión a lo largo de distintas direcciones para retener las parejas de más rápida divergencia (Boffetta et al., 2001). La integración numérica se realizó usando un esquema estándar de Runge-Kutta de cuarto orden con un paso de tiempo de integración de $dt=6$ horas. La interpolación espacio - temporal de los datos de velocidad se logró mediante interpolación bilineal.

Debido al objetivo del presente capítulo (identificar las estructuras de transporte asociadas con los procesos de pequeña escala caracterizando los frentes de surgencia), el interés se centró en las escalas de tiempo pequeñas. De esta manera el tiempo de integración se restringió a 7 días, debido a que es una escala de tiempo comparable a la escala de tiempo de los eventos de surgencia intensos. Por lo tanto, si el tiempo τ es mayor a 7 días, definimos $\lambda=0$. Finalmente, el tiempo de integración de las partículas puede ser realizado hacia adelante o hacia atrás en el tiempo.

Este estudio se enfocó en la dinámica hacia atrás en el tiempo, debido a que al integrar hacia atrás en el tiempo los FSLE identifican regiones de máxima

compresión local que se aproximan a las estructuras coherentes Lagrangianas LCS (Haller & Yuan, 2000; d'Ovidio et al., 2004; Shadden et al., 2005; Tew Kai et al., 2009; Hernández-Carrasco et al., 2011).

5.3.2 Dispersión de partículas Lagrangianas - ICHTHYOP

Con el fin de analizar el transporte de partículas durante los eventos de surgencia, se computaron las trayectorias de partículas sintéticas utilizando el software ICHTHYOP, descrito en Lett et al. (2008). En este capítulo utilizamos solamente el submódulo de movimiento, que simula los procesos de advección horizontal y vertical, junto con los procesos de dispersión horizontal y vertical; adicionalmente las partículas fueron consideradas como trazadores pasivos. En la sección 5.4.4 fueron comparadas las trayectorias obtenidas a partir de ICHTHYOP con las LCS computadas a partir de la integración directa del movimiento de partículas en el campo de velocidades horizontales de CROCO. De esta forma, se comprobaron que las principales características observadas a partir de la identificación de las LCS reflejan el movimiento de partículas bajo esquemas de advección más complejos como ICHTHYOP, que considera el movimiento tridimensional y los procesos de subgrilla.

El modelo ICHTHYOP fue aplicado considerando la resolución de los campos de velocidad de corriente, temperatura y salinidad previamente obtenidas con el modelo numérico CROCO. En ICHTHYOP, esos campos fueron interpolados en el espacio para proveer valores en cualquier ubicación de las partículas. También fueron interpolados en el tiempo debido que el paso de tiempo considerado por el IBM fue de 200 s, permitiendo así el abordaje de procesos de menor escala que los de la grilla de CROCO. Las simulaciones consistieron en seguir la ubicación y propiedades de las partículas. Las salidas del modelo se grabaron cada 24 hs,

La trayectoria de las partículas fue seguida durante la evolución de dos eventos de surgencia intensos (20 al 28 de Febrero de 2008 y 05 al 13 Enero

de 2011). Cada simulación consideró dos parches de 1000 partículas cada uno, liberadas en la región costera (Figura 20) y sus trayectorias fueron seguidas durante 9 días. Cada parche liberado tuvo 2 m de espesor y se liberó a 2 m de profundidad. Adicionalmente, en cada simulación de ICHTHYOP consideramos a las partículas como elementos pasivos en suspensión, sin transformaciones biogeoquímicas, sin flotabilidad ni velocidades verticales. Todas las trayectorias Lagrangianas fueron computadas por ICHTHYOP como trayectorias directas, con las partículas siendo transportadas desde una única fuente aún ubicada en superficie (a 2 m de profundidad).

5.4 Resultados Lagrangianos

5.4.1 Experimentos de sensibilidad

Los siguientes resultados se corresponden con una de las fechas de surgencia identificadas seleccionada aleatoriamente (31 de Enero de 2008), y se muestran con el fin de evidenciar cómo las características del campo de FSLE (y por lo tanto de las LCS identificadas) varía, dependiendo de los parámetros seleccionados. Como una primera prueba, se fijó δf en 0.3° y fueron comparados varios mapas para distintos δi (Figura 25). Se comenzó con una distancia inicial entre partículas igual a la resolución de la grilla de velocidades del modelo y se fue reduciendo sucesivamente el parámetro δi . Las LCS detectadas mantuvieron su configuración, mientras que sus rasgos se fueron volviendo más nítidos al disminuir la distancia inicial de separación. Adicionalmente, al disminuir δi , los requerimientos computacionales fueron incrementándose. Considerando la resolución del modelo y la escala de los procesos de interés, $\delta i=0.01^\circ$ representa un buen compromiso entre la resolución de los mapas de FSLE y la eficiencia computacional para resolver estructuras en el rango de aproximadamente 1 km.

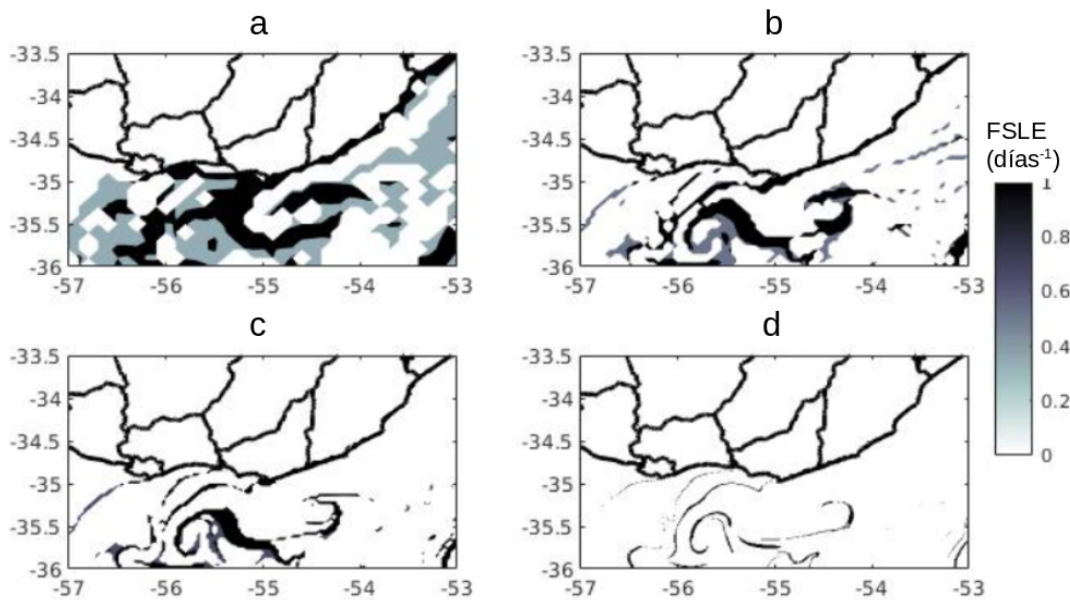


Figura 25: Mapas de prueba de FSLE (días^{-1}) computados para un fecha de surgencia seleccionada arbitrariamente (31 Enero de 2008) para distintos valores de δ_i : (A) 0.1° , (B) 0.05° , (C) 0.03° y (D) 0.01° . El parámetro δ_f se fijó en 0.3° .

Una vez seleccionado el valor de δ_i , se realizó un análisis de sensibilidad de las LCS detectadas para distintos valores de δ_f , se consideraron separaciones entre 0.1° y 0.4° correspondientes con distancias entre 11 y 44 km respectivamente (Figura 26). Usualmente, solo un grupo limitado de partículas alcanzan la separación final relativa seleccionada. Cuanto mayor es la distancia final, mayor es el tiempo requerido para que cada par de partículas se separe hasta esa distancia. Así para pequeños δ_f , muchas parejas alcanzan esa separación en muy poco tiempo y las estructuras en los mapas de FSLE son amplias y casi indistinguibles entre sí, ya que también se detectan para estructuras de transporte muy débiles. Por otro lado, para grandes valores de δ_f , pocas partículas alcanzan ese valor y las estructuras resultantes están formadas solamente por unos pocos puntos en el mapa. Éstas están asociadas con estructuras más fuertes y persistentes, las cuales

son más relevantes para caracterizar las propiedades de transporte del fluido. En conclusión, se considera que la distancia final que permite la identificación de estructuras de transporte para cualquier condición de viento en estudio es $\delta f = 0.3^\circ$ (Figura 26).

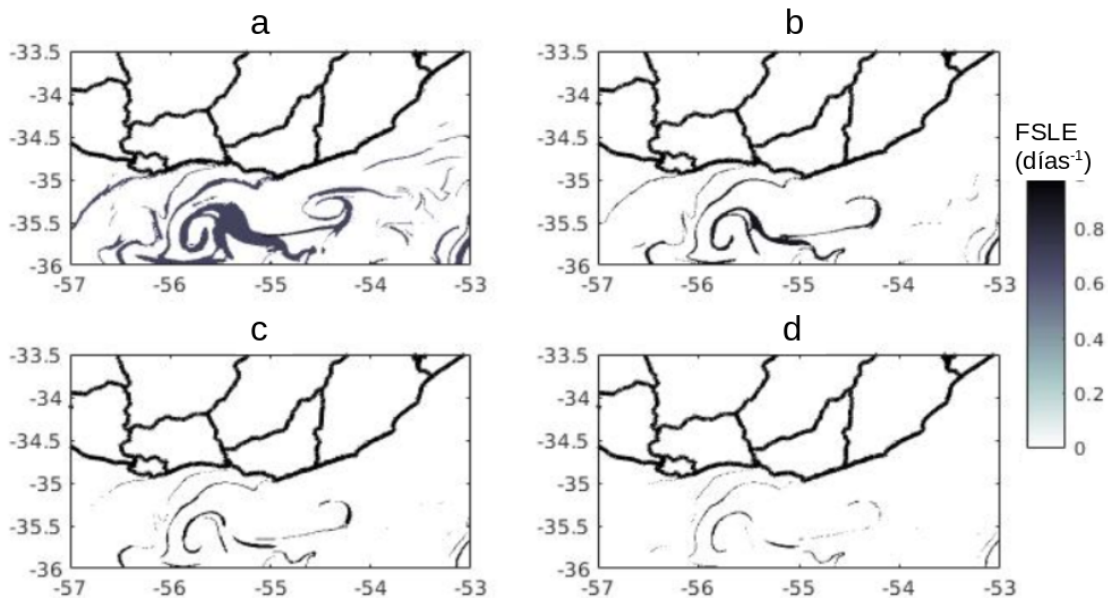


Figura 26: Mapas de prueba de FSLE (días⁻¹) computados para una fecha de surgencia (31 Enero 2008) para valores de δf : (a) 0.1° , (b) 0.2° , (c) 0.3° y (d) 0.4° . El parámetro δi fue seteado a 0.01° .

5.4.2 Caracterización media de la mezcla horizontal

La técnica de los FSLE provee un método para el cálculo simultáneo de la actividad de mezcla y las estructuras coherentes que controlan el transporte a una escala determinada. En esta sección analizamos los procesos de mezcla costera y en la próxima los intercambios de fluido entre la región costera y mar adentro a partir de la aproximación Lagrangiana. Para el primer objetivo, computamos los promedios temporales de FSLE, obteniendo un mapa de actividad de mezcla sobre la zona costera uruguaya para todos los días de verano; y otro exclusivamente considerando las fechas de surgencia intensa.

Áreas con mayores valores de FSLE son identificadas como zonas con mezcla horizontal más persistente (d'Ovidio et al., 2004).

En promedio durante el verano, se registró una intensa actividad de mezcla sobre la costa uruguaya, principalmente en la región oceánica (entre Punta del Este y La Paloma), y que se extiende hacia el suroeste y hacia mar adentro. Esta intensa actividad de mezcla es concordante con la ubicación de las surgencias climatológicas durante el verano como vimos en el capítulo anterior. Se observa un segundo máximo, de menor amplitud, ubicado sobre Montevideo que se extiende hacia el oeste y mar adentro. Al evaluar solamente las fechas de surgencia intensa, las tasas de mezcla se vuelven importantes en toda el área costera; pero principalmente sobre la región estuarina de la costa uruguaya (Figura 27), consistente con la ubicación del agua fría que llega a superficie durante dichos eventos (capítulo 4; Trinchin et al., 2019).

Estudios previos (Rossi et al., 2008; Rossi et al., 2008; El Aouni et al., 2019) registraron correlaciones negativas entre las tasas de mezcla horizontal y la distribución satelital de clorofila *a* sobre grandes áreas de surgencia, sugiriendo como explicación un cambio en la respuesta del fitoplancton a la turbulencia, desde un efecto negativo sobre las áreas costeras muy productivas a un efecto positivo en el océano abierto. En nuestra región de estudio, los valores de clorofila *a* satelital no son realistas debido a la presencia de material particulado en suspensión absorbiendo en el mismo rango espectral que la clorofila *a* (Doglioti et al., 2021). En este sentido, futuros estudios en el área que consideren mediciones de clorofila *a* in situ serían importantes para comprender los efectos de la turbulencia derivada de las surgencias sobre la productividad costera.

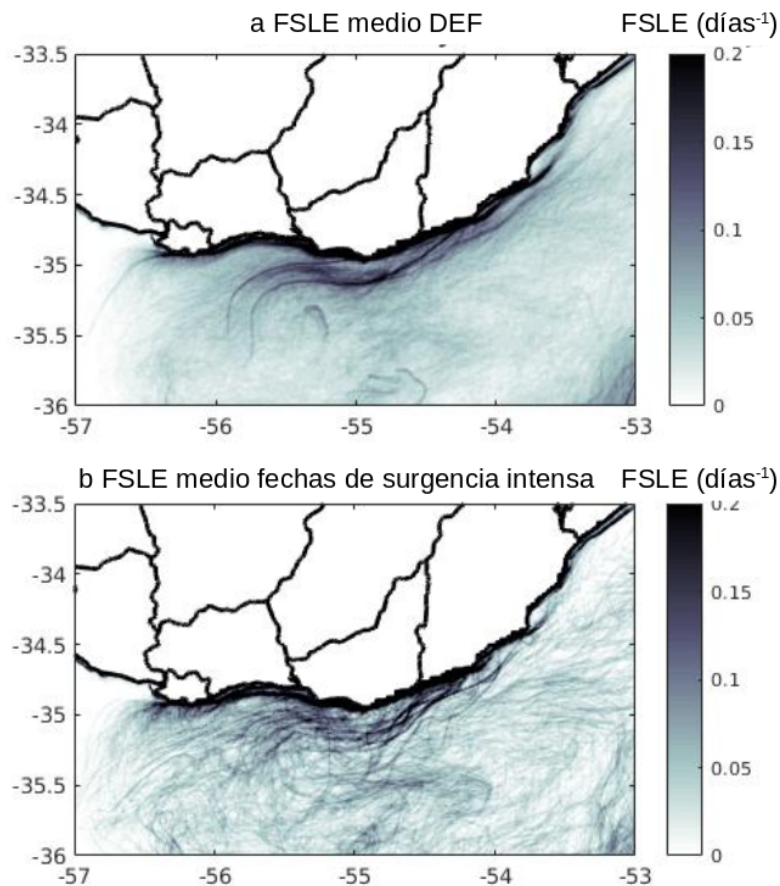


Figura 27: Promedio de FSLE (días^{-1}) calculados para (a) verano 2004 - 2012 (Diciembre - Enero - Febrero) y (b) para fechas de surgencia intensa obtenidas a partir del MCA.

5.4.3 Patrones de LCS durante eventos de surgencia intensa

Para analizar los patrones de las LCS bajo condiciones de vientos anómalos del sector NE responsables por los eventos de surgencia intensos, varios eventos fueron analizados y resultados para algunas de las fechas en que ocurrió surgencia intensa se muestran en la Figura 28. Los mapas muestran

las LCS para un día aproximadamente en la mitad de los eventos particulares de surgencia intensa, de manera de asegurar que las condiciones dinámicas consideradas son representativas del fenómeno que queremos estudiar.

Los patrones de transporte durante los eventos de surgencia intensa no son iguales para las distintas fechas analizadas, pero sin embargo algunas estructuras comunes pueden ser reconocidas durante estos eventos que no están presentes durante las fechas en que no fueron detectadas surgencias intensas (ver Figuras 28 y 29). Por ejemplo, durante los eventos de surgencia intensa pueden identificarse LCS con una estructura SW - NE bastante perpendicular a la costa sobre la porción oceánica de la región costera (Maldonado y Rocha), se extiende paralela a la costa y luego hacia mar adentro frente a la porción estuarina (Canelones y Montevideo). Esta estructura identificada marca la convergencia entre aguas frías llevadas a superficie durante el afloramiento y aguas cálidas superficiales circundantes (Figuras 30 a y b). Por otro lado, durante las fechas en que no se registraron eventos de surgencia intensa, también se observan estructuras, en este sentido se registraron LCS localizados principalmente sobre la región oceánica de la costa (Figura 29). Considerando que la surgencia climatológica se encuentra presente durante el verano sobre la costa uruguaya, ésta podría ser responsable de los LCS registrados cercanos a la costa oceánica con intensidad variable durante las fechas en que no se registraron eventos de surgencia intensa.

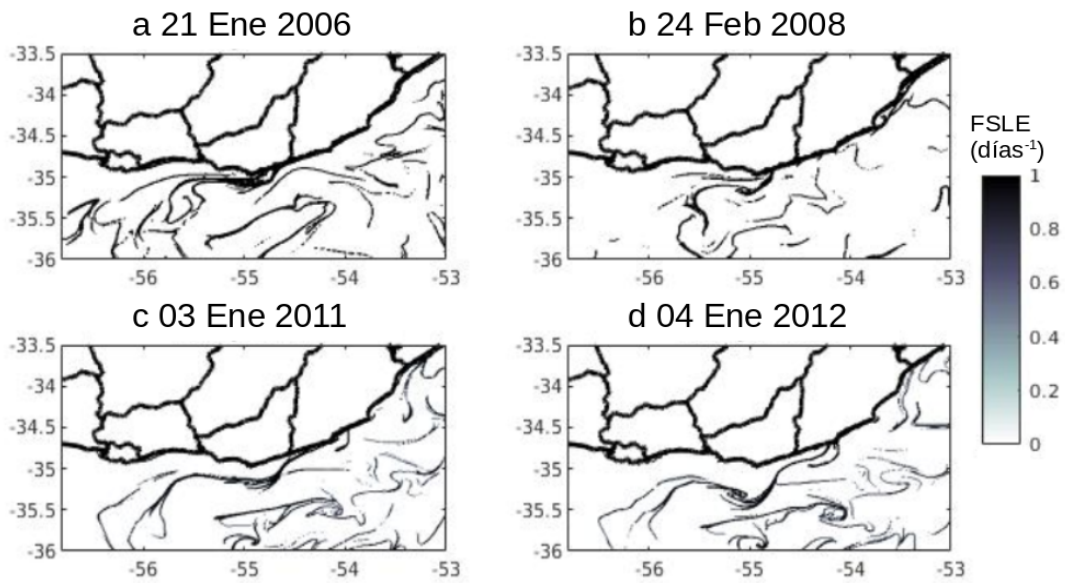


Figura 28: Mapas de LCS obtenidos para distintas fechas de surgencia intensa (las fechas especifican el comienzo de la simulación de las trayectorias hacia atrás en el tiempo).

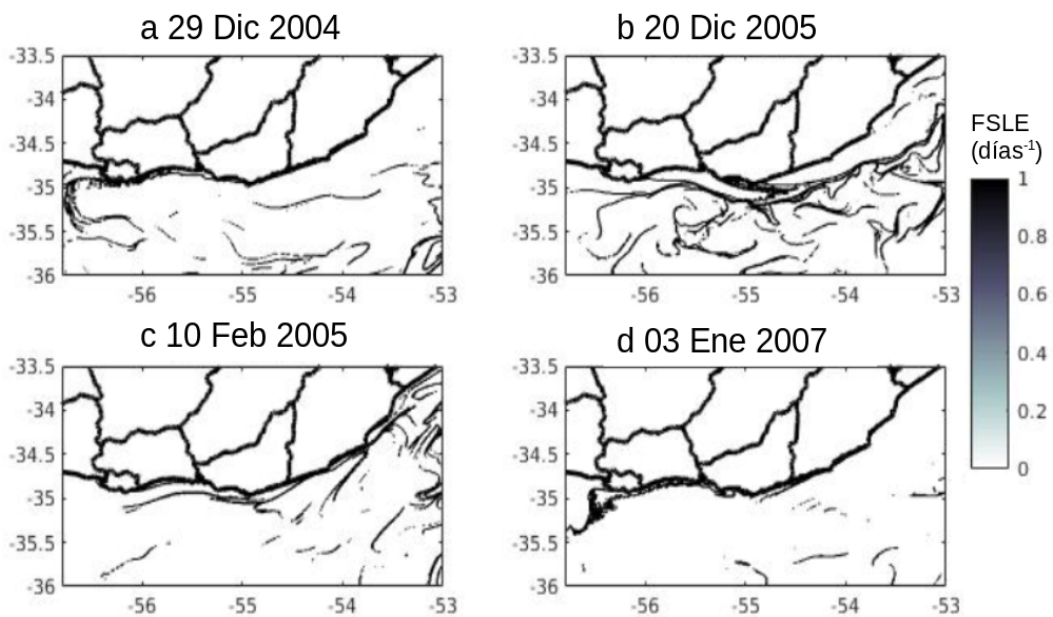


Figura 29: Mapas de LCS obtenidos para distintas fechas en que no se registraron eventos de surgencia intensa (las fechas especifican el comienzo de la simulación de las trayectorias hacia atrás en el tiempo).

Las líneas de LCS muestran la posición de los frentes de convergencia para cada caso particular. Al comparar la distribución de las LCS con la SST simulada y con la distribución de clorofila *a* satelital (MODIS-AQUA) para una fecha particular de surgencia (21 de Febrero de 2008), dos frentes con distintos orígenes pudieron ser distinguidos: el frente de surgencia y el frente de turbidez (principalmente halino), resaltando la importancia de las aproximaciones Lagrangianas para detectar regiones frontales con distintos orígenes (Figura 30b y 31b). En este sentido, es reconocido que trazadores como clorofila *a*, material en suspensión y temperatura superficial se distribuyen siguiendo las líneas de LCS creando la típica estructura de filamentos (Tél and Gruiz, 2006; Lehan et al., 2007; Tew Kai et al., 2009; Calil and Richards, 2010). Estas estructuras temporales pueden permanecer por varios días y trasladarse desde la región estuarina hacia mar adentro. También suelen aparecer periódicamente en la misma ubicación (como se observa para los eventos de surgencia en la Figura 28).

En los casos analizados, el frente de surgencia identificado a partir de los FSLE coincide con la ubicación del máximo gradiente de SST simulada (Figura 30). Al comparar la distribución de SST observada con la simulada para un día particular de surgencia, se observan diferencias. En este sentido, aunque el modelo simula las principales características de los eventos de surgencia, se encontraron diferencias principalmente al Este de La Paloma, donde se observa un mayor gradiente de SST en los datos simulados (comparar Figura 30 b con 31 a). Estas diferencias surgen probablemente debido a sesgos del modelo que afectan la simulación de las corrientes costeras y los patrones de temperatura.

Por otro lado el frente de turbidez se identifica al oeste del área de estudio, presenta menores valores de FSLE (no se muestran) y su ubicación no se observa claramente a partir de la SST simulada, pero se evidencia en la

imagen de clorofila *a* satelital (Figura 31 b). En este sentido, es importante señalar que los valores de clorofila *a* registrados satelitalmente en el área (hasta 15 mgm^{-3}) son extremadamente altos y podrían ser utilizados como indicadores de material en suspensión pero no como concentración real de clorofila *a* en esta región (debido a que el material particulado proveniente de las descargas continentales puede absorber en la misma banda espectral que la clorofila *a*).

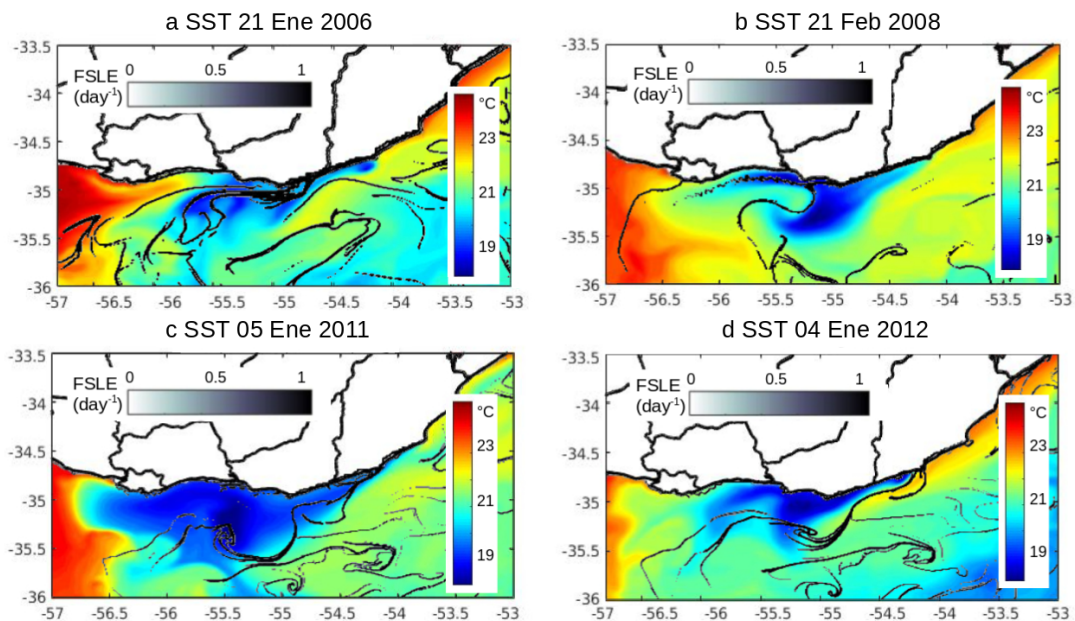


Figura 30: SST simulada con CROCO durante fechas de surgencia intensa, se muestran las líneas de LCS para (a) 21 Enero 2006, (b) 21 Febrero 2008, (c) 05 Enero 2011 y (d) 04 Enero 2012.

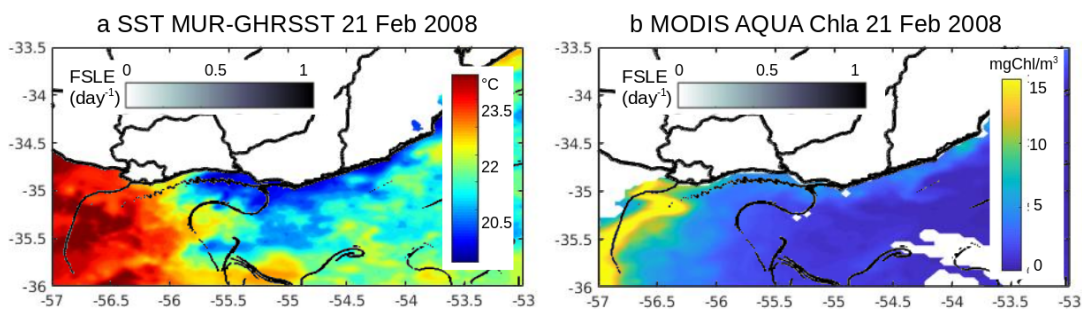


Figura 31: SST observada (MUR-GHRSSST) (a) y distribución satelital de Clorofila a (MODIS-AQUA) (b) para el 21 de Febrero de 2008. Se muestran superpuestas las líneas de LCS.

5.4.4 Evolución de LCS y comparación con transporte de partículas

Con el fin de enfocarnos en las estructuras de transporte horizontal durante surgencia intensa, fueron seguidas las LCS durante dos eventos identificados de surgencia intensa, de acuerdo a la Tabla 1: 20 - 28 Febrero 2008 (incluye la totalidad del evento) y 05 - 13 Enero 2011 (analizamos 9 días de surgencia consecutivos dentro del evento más largo registrado).

Los eventos analizados mostraron distintos comportamientos en cuanto al transporte. El evento de Febrero de 2008 se centró en la porción estuarina de la costa uruguaya. Los frentes de convergencia se localizaron en un primer momento sobre la región estuarina y se movieron mar adentro tomando una dirección hacia el Sur junto con la evolución del evento. El movimiento de las partículas Lagrangianas, obtenido con ICHTHYOP, resultó consistente con las líneas de LCS y tendió a seguirlas. Las partículas siguieron las líneas de LCS y se movieron hacia mar adentro junto con la migración de las líneas de máxima convergencia (Figura 32). Es relevante resaltar que los FSLE fueron calculados a partir de un esquema de advección más simple que el utilizado por ICHTHYOP, por ello la concordancia entre ambas aproximaciones confirma la robustez de las estructuras Lagrangianas encontradas.

A continuación analizamos el evento de surgencia de Enero de 2011 que duró un mes entero (25 Diciembre de 2010 – 25 Enero 2011) y fue el evento más largo registrado en el presente análisis. Al comienzo del período estudiado durante este evento, las líneas de LCS se concentraron en la porción oceánica de la costa y se movieron al oeste y mar adentro durante la evolución de la surgencia. Similar al caso anterior analizado, el transporte de las partículas Lagrangianas resultó consistente con las líneas de LCS y tendió a seguirlas. Sin embargo, en este caso, las líneas de LCS y consecuentemente el transporte de partículas muestran distintos patrones. Durante este evento, ambos parches de partículas liberados se movieron primero al Este, evolucionaron de manera similar cercanos a la costa y luego siguieron dos líneas diferentes de LCS hacia mar adentro con dirección suroeste (Figura 33).

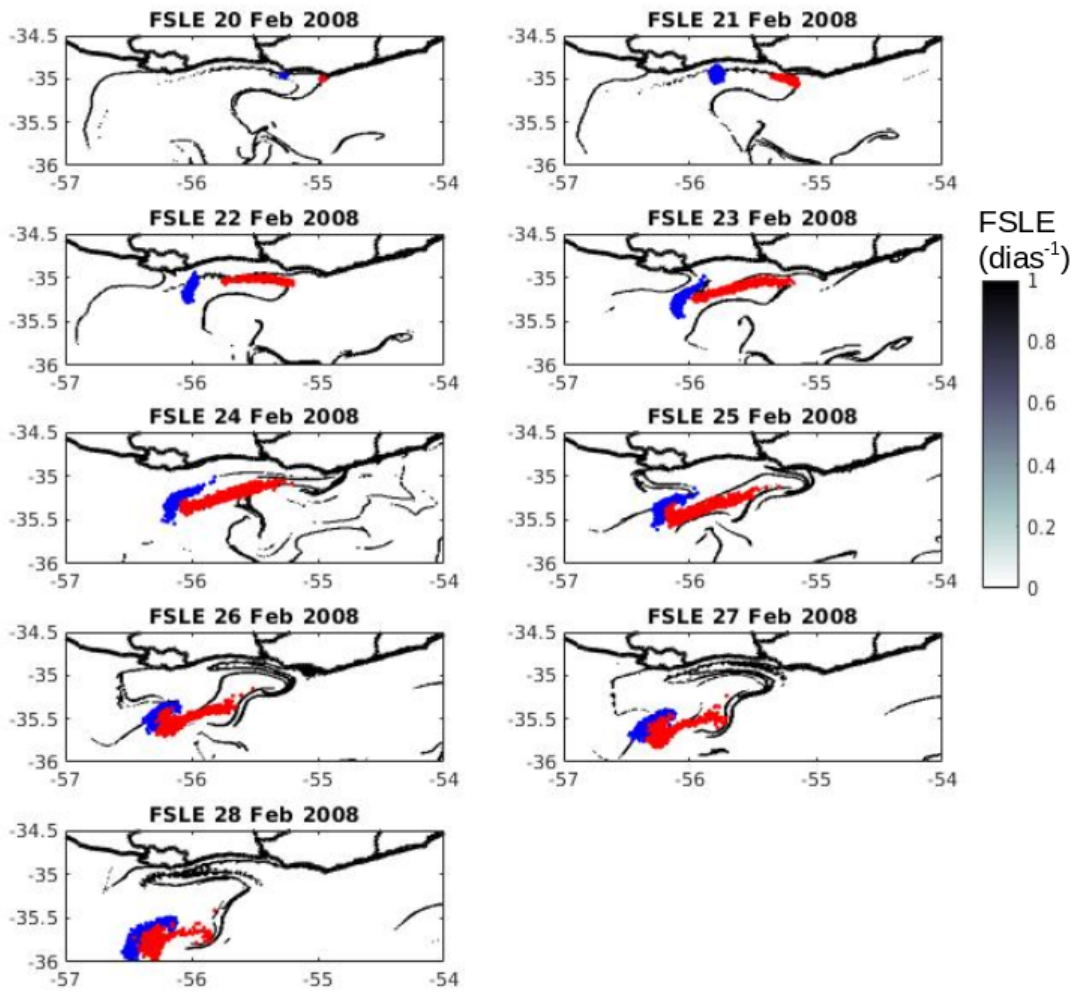


Figura 32: Evolución de las líneas de LCS durante el evento de surgencia de Febrero de 2008. Se muestran las trayectorias de las partículas simulados por ICHTHYOP (puntos rojos y azules) sobre las líneas de LCS.

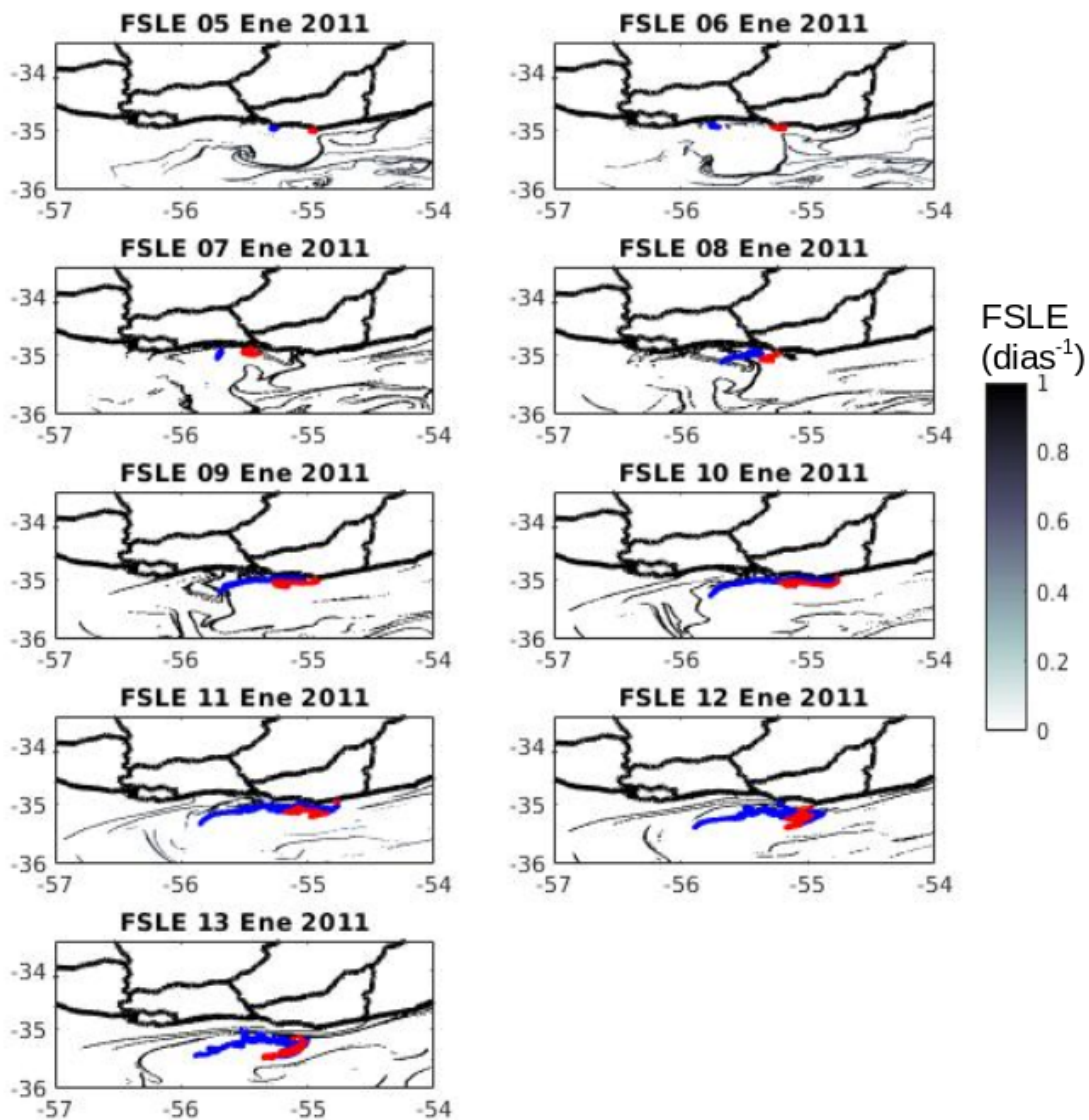


Figura 33: Evolución de las líneas de LCS durante el evento de surgencia de Enero de 2011. Se muestran las trayectorias de las partículas simulados con ICHTHYOP (puntos rojos y azules) sobre las líneas de LCS.

Las líneas de LCS estarían actuando como barreras al transporte de partículas. Mientras estas líneas se mantienen a cierta distancia de la costa, las partículas liberadas cerca de la costa no se alejan más allá de las líneas, y si se sueltan del otro lado de las líneas no se acercan a la costa. Eventualmente, las líneas se destruyen y reorganizan y es en esos momentos

en que las partículas pueden entrar o salir de la zona costera como se observa en las Figuras 32 y 33. Como consecuencia, la evolución de los patrones de convergencia migrando hacia mar adentro, sería un medio de transporte desde la costa al océano abierto relacionado a los procesos de surgencia, con respuestas ecológicas a distintos niveles.

El transporte de partículas y organismos planctónicos fue evidenciado en los experimentos de transporte de partículas y resultó consistente con Meerhoff et al. (2020), quienes sugieren transportes de larvas hacia mar adentro durante eventos de surgencia intensos. Los efectos ecológicos de la retención y transporte producidos por las líneas de LCS han sido previamente estudiados para otras regiones. Por ejemplo, han sido utilizadas para entender la dispersión de los bloom fitoplanctónicos (Olascoaga et al., 2006; Olascoaga, 2010; Pérez-Muñuzuri and Huhn, 2010; Lehahn et al., 2007). Adicionalmente, han sido registradas respuestas en mayores niveles ecosistémicos. En este sentido, la combinación de análisis de FSLE con datos de localización satelital proveyeron evidencia directa de que predadores tope (como albatros y elefantes marinos) son capaces de seguir las líneas de LCS en la búsqueda de parches de alimento (Kai et al., 2009; Cotté et al., 2015). También fueron registrados máximos de captura pesquera en el Pacífico Noroeste sobre frentes Lagrangianos que demostraron poseer condiciones favorables a las pesquerías (Prants et al., 2014, Prants et al., 2021).

5.5 Comentarios finales y conclusiones

El transporte superficial en la zona costera uruguaya ha sido investigado por primera vez mediante la aplicación de la técnica de FSLE sobre el campo de velocidad superficial obtenida del modelo numérico CROCO. El análisis se realizó para el verano que es cuando es reconocida la existencia de surgencias intensas sobre la costa uruguaya (Simionato et al., 2010, Meccia et al., 2013; Trinchin et al., 2019; de Mello et al., 2022).

Estudios previos (d'Ovidio et al., 2009; García-Olivares et al., 2007) han confirmado la ventaja del uso de la técnica de los FSLE sobre los diagnósticos Eulerianos tradicionales en la detección de estructuras de transporte que separan regiones dinámicamente distintas en un fluido. Siendo esta la primera vez que se utilizó la técnica de los FSLE en la costa uruguaya se consideró relevante investigar la sensibilidad respecto a los parámetros clave (distancia inicial, δi y separación final de las partículas, δf) que controlan la cobertura de líneas de LCS y la visibilidad de los detalles. Los valores seleccionados permitieron identificar e investigar la evolución de las estructuras de transporte más intensas.

Los promedios temporales de FSLE dan una idea aproximada de la turbulencia sobre la costa uruguaya y regiones oceánicas adyacentes, y permitieron diferenciar la región costera de la región *offshore* durante el verano en función de las propiedades de mezcla. La intensa mezcla en la región costera oceánica durante el verano, así como su aumento durante las fechas de afloramiento intenso (resaltando el aumento de la mezcla en la región costera estuarina), tendría consecuencias ecológicas a diferentes niveles. Por ejemplo, Rossi et al (2008) encontraron que el aumento de la mezcla en una región altamente productiva puede disminuir la productividad primaria al aumentar la dispersión de nutrientes en las aguas superficiales. En este sentido, futuros estudios que relacionen el impacto del aumento de la turbulencia con sus respuestas ecológicas serían necesarios para comprender en profundidad el efecto de las surgencias de verano en nuestra región de estudio en particular.

Información más detallada fue obtenida al estudiar las cantidades no promediadas, las cuales revelaron la existencia de barreras al transporte. En este sentido, el análisis de FSLE reveló la presencia de estructuras concentradas frente a la costa uruguaya que migran hacia mar adentro

durante eventos de surgencia intensos. Su importancia en el transporte de partículas fue verificada mediante la liberación de trazadores sintéticos que siguieron las líneas de LCS. De esta manera, el transporte producido por las líneas posiblemente tenga implicancias ecológicas, reteniendo y redireccionando hacia mar adentro el transporte de partículas en suspensión, nutrientes, y organismos planctónicos durante eventos intensos de surgencia, con consecuencias a distintos niveles ecosistémicos. Así mediante ambas aproximaciones Lagrangianas se verificó la hipótesis planteada sobre los frentes de convergencia generados durante eventos de surgencia y su rol en los procesos de transporte.

Para comprender mejor el impacto de las estructuras de transporte derivadas las surgencias de verano en la región marina uruguaya, estudios futuros que consideren la relación entre e.g. capturas pesqueras, ubicación de alimentación de tortugas, etc., con la ubicación y evolución de las líneas LCS serían necesarios. Finalmente, considerando la cantidad y diversidad de actividades humanas que ocurren en la costa uruguaya y área marina adyacente (e.g. exploración de hidrocarburos, transporte, turismo y actividades pesqueras), las aproximaciones Lagrangianas en general y la técnica de FSLE en particular, son herramientas importantes que estudios de impacto ambiental, de planificación marina y diseños de áreas marinas protegidas deberían incluir. De esta manera se lograría evaluar adecuadamente la región costero - marina uruguaya y su conectividad, disminuyendo así posibles conflictos ambientales; y en el caso de accidentes marinos sería posible identificar áreas para circunscribir la intervención y orientar las operaciones de emergencia.

6. RELACIÓN ENTRE FRENTES DE CONVERGENCIA Y LOCALIZACIÓN DE LA FLOTA INDUSTRIAL COSTERA DURANTE UN EVENTO DE SURGENCIA EN URUGUAY¹

¹Publicación asociada: de Mello, C., Barreiro, M. ., Marin, Y., Ortega, L., Trinchin, R., & Manta, G. (2022). Relación entre frentes de convergencia y localización de la flota pesquera durante la ocurrencia de surgencia costera en Uruguay. *INNOTEC*, (24 jul-dic). <https://doi.org/10.26461/24.03>.

6.1 Introducción y objetivos del Capítulo

En el capítulo anterior se utilizaron aproximaciones Lagrangianas mediante salidas de un modelo numérico para evaluar los procesos de transporte horizontal asociados a las surgencias costeras y de esta manera realizar inferencias en cuanto a los efectos de las surgencias sobre las comunidades planctónicas.

En este capítulo se continuó profundizando en la descripción de los procesos físicos y su interrelación con los procesos biológicos asociados. Se buscó contribuir a comprender desde una aproximación Lagrangiana la relación entre los eventos de surgencia y la localización de la pesquería industrial costera (Categoría B) en el área uruguaya.

Así, en este capítulo se consideraron las fechas de surgencia identificadas en el capítulo anterior y se comparó la posición de los frentes lagrangianos con la posición de la flota pesquera. Adicionalmente se seleccionó el evento comprendido entre el 20 y 28 de Febrero de 2008 para profundizar en el estudio tanto de las condiciones físicas del evento en sí, como para evaluar la relación entre las LCS identificadas con la concentración de los recursos pesqueros.

Este capítulo se organiza de la siguiente manera: la sección 6.2 menciona las generalidades del modelo y de la aproximación Lagrangiana así como el área de estudio, la sección 6.3 refiere a la posición de la flota industrial pesquera utilizada en este trabajo; la sección 6.4 analiza eventos de surgencia intensa y

su relación con la posición de la flota durante actividades de pesca. Finalmente en la sección 6.5 se encuentran los comentarios finales y las conclusiones del capítulo.

6.2 Generalidades del modelo numérico, aproximación Lagrangiana y área de estudio

Para el presente estudio se utilizaron las salidas del modelo numérico CROCO para la región costera uruguaya, y la posición de las Estructuras Coherentes Lagrangianas (LCS) computadas mediante el método de los Exponentes de Lyapunov de Tamaño Finito (FSLE), utilizando los mismos parámetros que en el Capítulo 5.

El modelo (1/36° de resolución horizontal y 40 niveles verticales) ha demostrado reproducir adecuadamente las condiciones oceanográficas medias y su variabilidad durante el verano (de Mello et al., 2022 y Capítulos 4 y 5). El área de estudio del presente capítulo constituye el área de operación de la flota industrial costera uruguaya Categoría B (Figura 34).

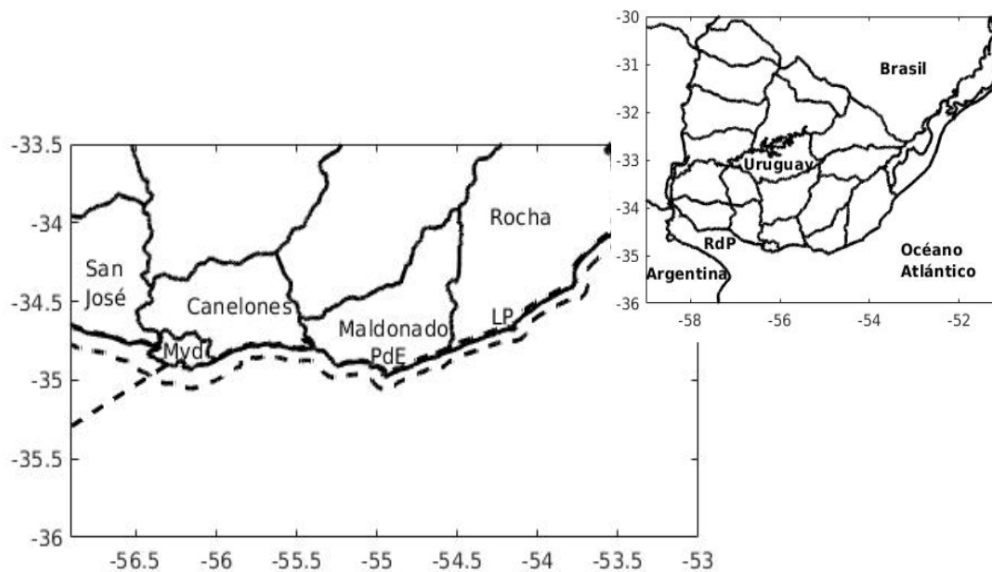


Figura 34: Área en la que se analizó la operación de la flota Categoría B y su relación con los frentes Lagrangianos. Las líneas punteadas representan los límites de las áreas de veda pesquera los cuales no pueden ser atravesados hacia la costa ni hacia el Oeste por los buques categoría B. Mvd= Montevideo, PdE= Punta del Este y LP=La Paloma.

6.3 Posición de buques Categoría B durante operaciones pesqueras - VMS

La información de posición de la flota pesquera dirigida a recursos costeros fueron cedidos por el Laboratorio de Tecnología Pesquera (LTP) de la Dirección Nacional de Recursos Acuáticos. Los recursos costeros son accesibles tanto a embarcaciones de pesca artesanal (< 10 Toneladas de Registro Bruto, T.R.B.) como industriales (> 10 T.R.B.). Entre las últimas, las unidades de pesca dedicadas a su captura conforman una categoría específica, la Categoría B (Decreto N° 269/018). Las unidades agrupadas en esta categoría comparten una modalidad de pesca y un área de operación además de la especie objetivo. En este sentido, la categoría B se encuentra

dirigida a las especies corvina (*Micropogonias furnieri*) y pescadilla (*Cynoscion guatucupa*), pero también a su fauna acompañante.

El área de operación de los buques de esta categoría abarca el Río de la Plata y parte del frente oceánico. La mayor parte se realiza en profundidades menores a 50 m, en el Río de la Plata y sector Atlántico de la Zona Económica Exclusiva uruguaya. Los buques uruguayos no operan dentro de la Franja de Jurisdicción Exclusiva de Argentina (Tratado del Río de la Plata y su Frente Marítimo, Art. 2), y se han definido áreas de exclusión para esta categoría en base a criterios de ordenación pesquera que limitan la operación al oeste de Montevideo (Resolución CARP-CTMFM N° 1/04) y a lo largo de la costa uruguaya en una franja de 7 y 5 millas náuticas (Decreto N° 115/018), (Figura 33)

La información proporcionada para este trabajo comprende las emisiones de monitoreo satelital de VMS diarias de los buques Categoría B, sin identificar, durante las operaciones de pesca para períodos cortos durante los veranos de 2008 y 2011. Es decir, aquellas emisiones registradas cuando los buques presentaron velocidades en el rango 3 y 4,6 nudos, rango en el cual quedan comprendidas la mayor parte de las operaciones de pesca con red de arrastre de fondo. Esta información fue comparada con la localización de los frentes de convergencia (líneas de LCS que se corresponden con los valores máximos de FSLE), identificados mediante la aproximación Lagrangiana en el Capítulo 5.

6.4 Eventos de surgencia intensa y su relación con la posición de la flota Categoría B

Se analizó la distribución de las líneas de LCS durante varias fechas puntuales de surgencia intensa (Tabla 1, Capítulo 5) para las que se obtuvo información satelital de VMS. Las fechas que se muestran en la Figura 35 se

corresponden con distintos días en los que ocurrió surgencia intensa y muestran las LCS junto con la posición de la flota Categoría B. En este sentido en la Figura 35 se muestran los frentes de convergencia para el primer día de un evento de surgencia intensa (Figura 35 a), para el último (Figura 35 b y c) y para un día en el medio del evento (Figura 35 d). Esto explica que las condiciones dinámicas durante las fechas analizadas fueran distintas y por ello las estructuras Lagrangianas encontradas se posicionaron en distintas regiones del área de estudio según la evolución de cada evento de surgencia en particular. En general, la posición de la flota resultó concordante con los frentes identificados mediante el método de FSLE, detectando grandes esfuerzos pesqueros sobre las LCS, cercanos a la costa de Montevideo, y en menor concentración sobre las líneas de FSLE hacia el este y mar adentro.

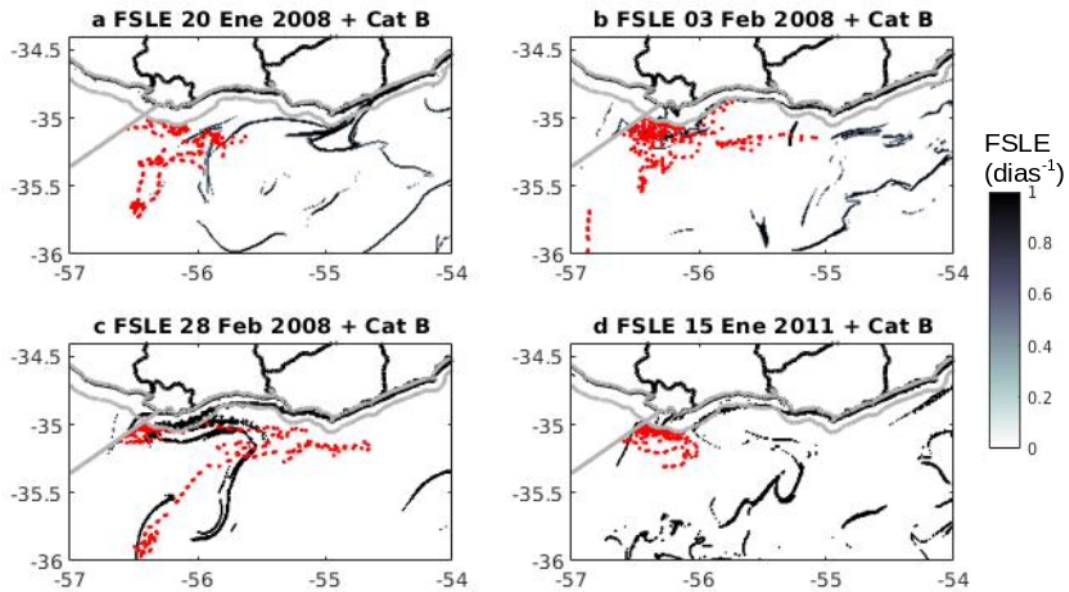


Figura 35: Mapas de LCS obtenidos para distintas fechas en que se registraron eventos de surgencia intensa (las fechas especifican el comienzo de la simulación de las trayectorias hacia atrás en el tiempo). Se muestran las emisiones satelitales (VMS) de la flota pesquera Categoría B durante las actividades de pesca (puntos rojos).

Se analizó con más detalle el evento de surgencia intensa comprendido entre los días 20 al 28 de Febrero de 2008. Este evento, fue simulado por CROCO pero también observado mediante imágenes satelitales provenientes de MUR-GHRRST durante las mismas fechas en que fue simulado por el modelo. La región donde ocurrió este evento de surgencia abarcó el área costera comprendida por las costas de Rocha hacia el Oeste, alcanzando Montevideo. En promedio, los menores valores de SST se encontraron frente al límite de las costas de Canelones y Maldonado. Si bien el modelo simula las principales características de este evento, se observan diferencias con los datos observados principalmente hacia el Este de La Paloma. Estas diferencias posiblemente se deban a diferencias en las corrientes costeras simuladas, las cuales influyen en los patrones de SST.

En particular, durante el evento analizado de acuerdo a las velocidades simuladas, los mayores niveles de mezcla horizontal se observaron en las regiones costeras de Maldonado y Rocha donde se extienden hacia mar adentro coincidiendo con el patrón observado en SST; y frente a la costa de Montevideo (Figura 36).

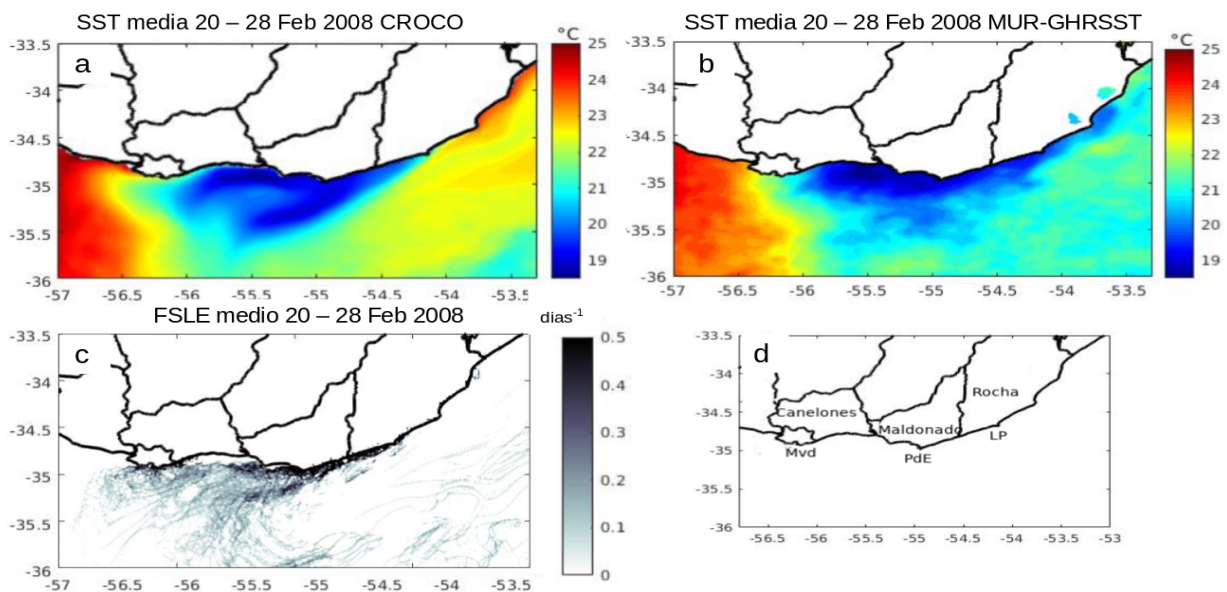


Figura 36: Promedio de temperatura de superficie del mar (SST) simulada (a) y observada (b) durante el evento de surgencia analizado. C- Promedio de los Exponentes de Lyapunov de Tamaño finito (FSLE) calculados durante el evento de surgencia analizado. D- Área de estudio Mvd=Montevideo, PdE=Punta del Este, LP=La Paloma.

Los valores máximos de los Exponentes de Lyapunov representan los frentes de convergencia. Como se mostró en el Capítulo 5 y para la misma fecha (Figuras 30 y 31), es posible identificar dos tipos de frentes con distintos orígenes: los frentes de surgencia (debidos al encuentro de aguas frías y más profundas que llegan a superficie durante a la surgencia, con aguas más

cálidas de superficie), y el frente halino de superficie (cuya ubicación en la fecha analizada coincidió con el frente de turbidez en la región más cercana a la costa uruguaya) al Oeste del área de estudio, correspondiente a la descarga del Río de la Plata y su encuentro con aguas oceánicas. La flota pesquera en esta fecha particular se encontró desarrollando sus actividades de pesca asociada a ambas regiones frontales encontradas (Figura 37).

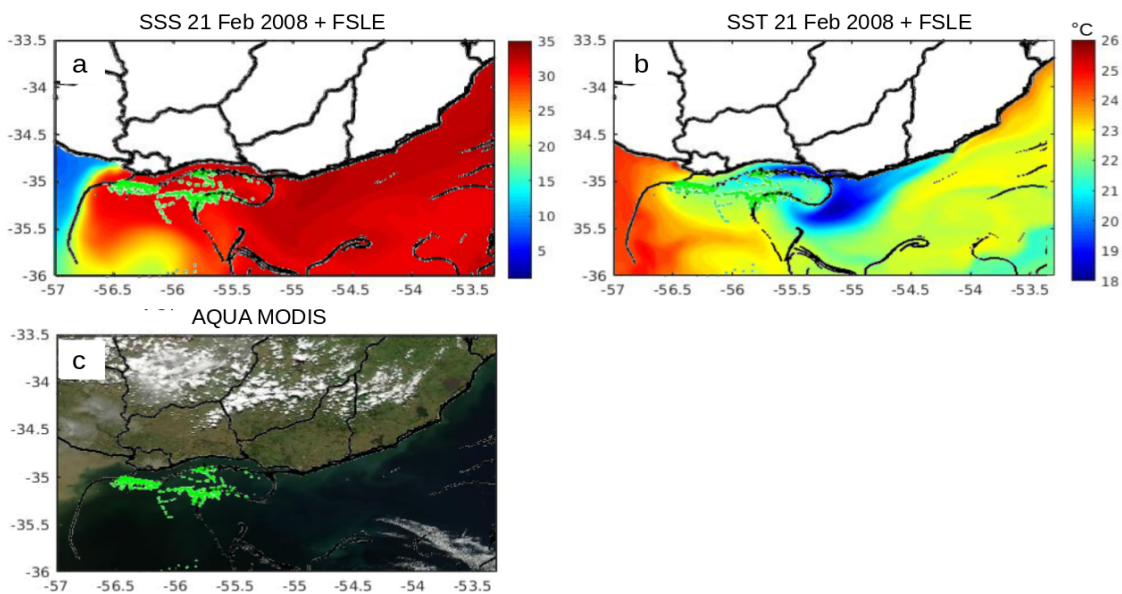


Figura 37: Salinidad y temperatura superficial (SS y SST, a y b) e imagen de color *True Color* de Modis Aqua (c) para el día 21 de Febrero de 2008.

Superpuestas se encuentran las líneas de LCS (negro) y las posiciones de buques categoría B registradas por VMS para esa fecha (verde).

Al analizar la evolución de la surgencia, se observaron frentes de convergencia que modifican su posición desplazándose hacia el Oeste y hacia el Sur, juntándose con otros, y que eventualmente salen del área de estudio hacia mar adentro o desaparecen. Estos frentes representan barreras físicas al transporte de partículas. En cuanto a la ubicación de la flota pesquera, la misma se encuentra limitada hacia la costa y al Oeste por las áreas de veda

(líneas punteadas de la Figura 34). Las emisiones de VMS tienden a concentrarse sobre el Oeste, sobre el frente de convergencia halino donde se ven limitadas por la zona de veda en la región más costera y sobre el Este, asociadas a los frentes de convergencias derivados de las surgencias (Figura 38).

Si bien la posición de la flota resultó concordante con la posición de los frentes de convergencia computados a partir de las velocidades simuladas, no es exacta. En este sentido, algunas de las diferencias entre las posiciones de la flota y los frentes de convergencia, podrían deberse a que las corrientes simuladas por el modelo presentan algunas diferencias con las corrientes reales existentes sobre la costa. Así, ajustes en el modelo, como forzarlo con flujos de calor con variabilidad interanual, así como con una mayor resolución podrían ayudar a simular de manera más exacta los procesos costeros.

Adicionalmente, es esperable que la posición de la flota no siempre siga a los frentes ya que tiene limitantes debido a la existencia de áreas de veda pesquera así como económicas. En general la flota opera desde Montevideo y el aumentar sus trayectos en la búsqueda de áreas de pesca hacia el este y mar adentro le implicaría un coste de tiempo y dinero posiblemente no favorable sin tener certeza de la concentración de recursos en estas zonas. Por lo cual futuros estudios dirigidos a comprender la relación entre los frentes Lagrangianos derivados de las surgencias y la concentración de recursos podría ser de utilidad para una mayor eficiencia de las actividades de pesca.

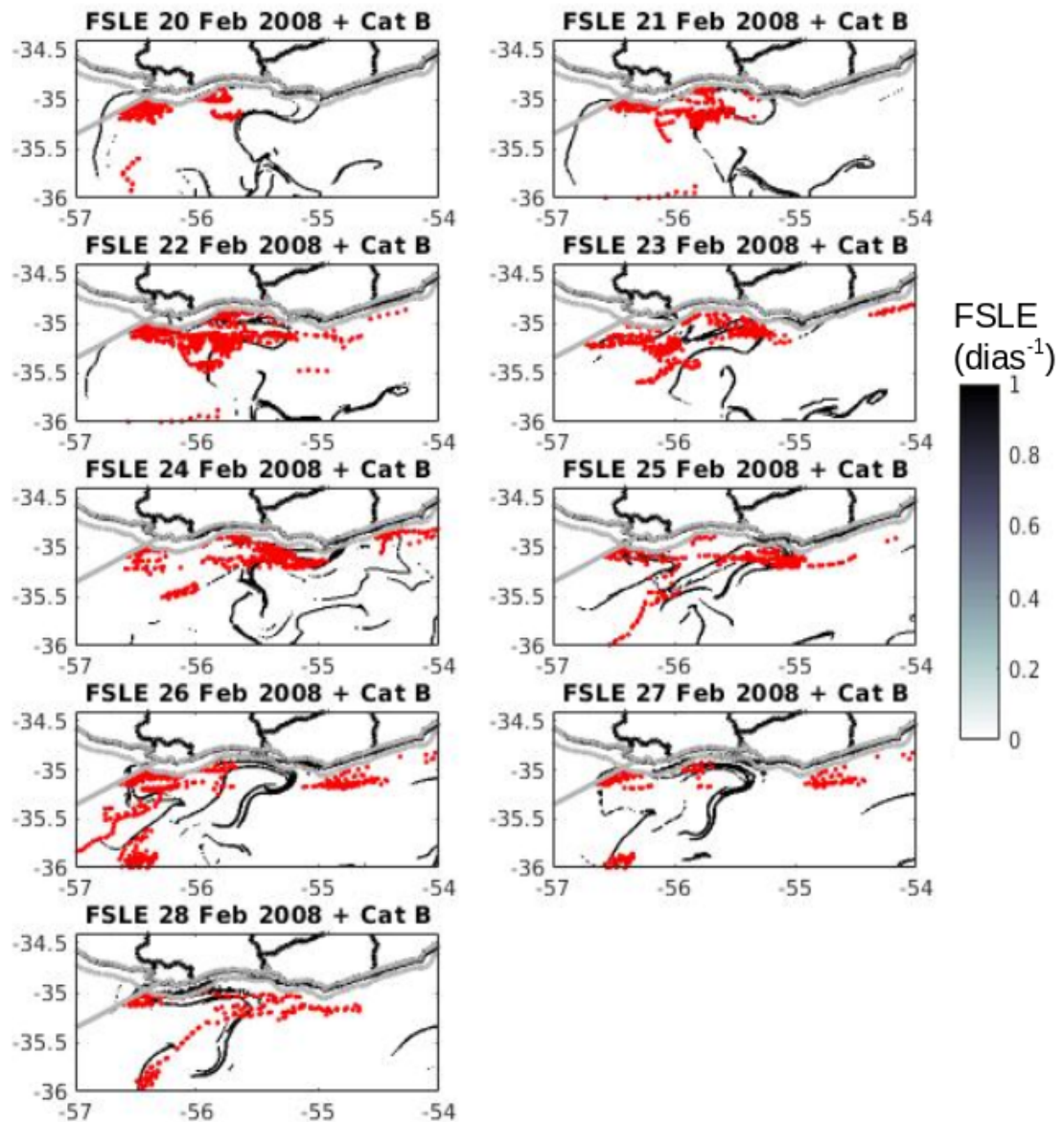


Figura 38: Evolución de las LCS (líneas negras) durante el evento de surgencia de Febrero de 2008. Se muestran las emisiones satelitales (VMS) de la flota pesquera Categoría B durante las actividades de pesca (puntos rojos). Las líneas grises representan las zonas de veda pesquera.

6.5 Comentarios finales y conclusiones

Es reconocido que las regiones de grandes surgencias costeras son las zonas biológicamente más productivas del planeta, contribuyendo con hasta el 20% de las capturas pesqueras (Pauly & Christensen, 1995, Kämpf & Chapman, 2016). Los procesos explicativos del aumento de productividad pesquera en las grandes zonas de surgencias se basa en el aumento de la productividad primaria relacionada al aporte de nutrientes de aguas frías y profundas que alcanzan la zona eufótica con la surgencia, con consecuencias en el resto de la trama trófica.

Asociadas a las grandes surgencias costeras se desarrollan frentes, áreas de retención y *eddies* que interactúan con la distribución espacial de los organismos planctónicos. Estos procesos de turbulencia modulan la estructura y biomasa de los ecosistemas ya que pueden estimular la productividad primaria con consecuencias sobre toda la trama trófica, y juegan un importante rol de intercambio entre las áreas costeras y el océano mediante el transporte de material orgánico de la costa hacia mar adentro (Oschlies & Garçon, 1998; Mackas et al., 2005).

En nuestra costa, se dan procesos de surgencia climatológica durante el verano sobre la región oceánica entre Punta del Este y La Paloma. Adicionalmente, durante el verano ocurren eventos particularmente intensos de surgencias sobre la costa estuarina entre Montevideo y Punta del Este asociados a vientos anómalos desde el sector Este, lo que es más frecuente durante años La Niña (Trinchin et al., 2019). Ni el efecto de las surgencias en el aporte de nutrientes a las aguas superficiales (las cuales de por sí presentan alto contenido de nutrientes debido al aporte del Río de la Plata) en la productividad primaria, ni alguna otra implicancia ecológica de las surgencias costeras en Uruguay han sido previamente estudiadas.

En este sentido, este trabajo representa un primer aporte al estudio de las implicancias ecológicas de las surgencias mediante el análisis de la relación entre los frentes derivados de las surgencias y la ubicación de los recursos pesqueros en la costa uruguaya, utilizando como *proxy* de la localización de los recursos las posiciones de la flota durante las actividades de pesca. En este sentido, la flota se encontró en posiciones concordantes con los frentes de convergencia, tanto con los relacionados a la surgencia como con el frente relacionado a la descargas del Río de la Plata, sugiriendo así una relación entre los procesos de retención y la ubicación de los recursos pesqueros.

Los frentes de convergencia retienen material en suspensión y organismos planctónicos que son alimento de diversas especies de peces, y tienen efectos en toda la trama trófica. Esto explicaría una mayor concentración de recursos pesqueros en sus cercanías, que se acerquen para alimentarse o los utilicen como áreas de reproducción. La relación entre los frentes de convergencia Lagrangianos y la pesca ha sido previamente estudiada en otras regiones del mundo. Por ejemplo, las mayores capturas en el Pacífico Noroeste se encontraron principalmente a lo largo de frentes Lagrangianos con condiciones favorables para la pesca (Prants et al., 2014; Prants et al., 2021).

En particular, durante la surgencia analizada, el esfuerzo pesquero se concentró cercano al frente halino al Oeste de Montevideo, y a frentes térmicos derivados de la surgencia. En este sentido en los períodos sin ocurrencias de eventos de surgencia sería esperable que los recursos y las actividades de pesca asociadas, se concentren en la región cercana al frente halino, del Río de la Plata.

Sería importante que futuros trabajos en esta dirección evaluaran la posición y evolución de los frentes de convergencia, el esfuerzo pesquero y su localización, durante condiciones en las que no se detecten surgencias, de

manera de poder contrastar con lo que ocurre durante los eventos de surgencia. Así podríamos tener una visión más completa del rol de las surgencias y sus frentes asociados en la localización de los recursos.

En general, la posición de la flota resultó concordante con la posición de los frentes de convergencia pero no fue exacta. En este sentido, algunas de las diferencias entre las posiciones de la flota y los frentes, podrían deberse a que las corrientes simuladas por el modelo presentan algunas diferencias con las corrientes reales existentes sobre la costa. Así, ajustes en el modelo podrían ayudar a simular de manera más realista la posición de los frentes de convergencia.

Finalmente, la aproximación Lagrangiana aplicada en este análisis así como futuros trabajos en esta dirección constituyen un importante insumo que podría ser utilizado como herramienta para optimizar tiempos de búsqueda de áreas operativas de la flota y como insumo para la administración pesquera.

7. DISCUSIÓN GENERAL Y PERSPECTIVAS

En este trabajo, se aplicó por primera vez la configuración de un modelo numérico de alta resolución tridimensional sobre el área marina uruguaya. Este modelo fue capaz de simular la variabilidad interanual de las condiciones oceanográficas en la región. Considerando la falta de información de variables oceánicas con amplia cobertura espacial y temporal en el área, los datos generados mediante las simulaciones realizadas adquieren especial relevancia para el estudio de procesos físicos, así como para correlacionar con información biológica y actividades humanas.

En esta tesis se puso el foco en las condiciones hidrodinámicas sobre la costa uruguaya durante el verano. Sin embargo, la información generada permite analizar las condiciones oceánicas también durante el resto del año, así como en regiones más distantes de la costa de las analizadas en este trabajo. De esta manera, se generó información oceánica con amplia cobertura espacial y temporal útil para otros estudios de las condiciones dinámicas y su variabilidad durante cualquier época del año. Adicionalmente, la configuración interanual alcanzada de este modelo con los parámetros utilizados, permite que el modelo sea también utilizado para simular períodos más cercanos al presente en el tiempo de manera relativamente sencilla, simplemente agregando los forzantes laterales y de superficie. De esta manera es posible estudiar procesos físicos más recientes en el tiempo con la misma configuración aplicada en este estudio.

Por otro lado, en esta línea futuros trabajos de modelación numérica que consideren configuraciones del modelo que consideren la variabilidad interanual de otros forzantes atmosféricos, como ser los flujos de calor, permitiría ahondar en la dinámica y consecuencias de otros procesos físicos de relevancia en el área como ser el estudio de las olas de calor marinas (Manta et al., 2018).

La presente tesis comprendió un análisis físico de las condiciones hidrodinámicas de la costa uruguaya durante el verano. En este sentido, se simularon los procesos de surgencia costera permitiendo comprender sus factores controladores, evolución y la estructura vertical de eventos intensos. Seguidamente, se analizaron los procesos de mezcla y transporte horizontal derivados de los procesos de surgencia costera, junto con sus implicancias en procesos de retención y transporte de partículas en suspensión, para finalmente correlacionar las estructuras de retención identificadas con la concentración de recursos pesqueros.

Así, a partir del estudio de la combinación de simulaciones y observaciones se identificó la presencia de una surgencia climatológica que ocurre durante el verano en la costa oceánica y se demostró su mayor (menor) intensidad durante los años en que ocurre el fenómeno La Niña (el Niño). Adicionalmente, fueron identificados eventos de surgencia intensa correlacionados a los vientos particularmente intensos del sector Este, que resultaron tener las mayores anomalías de SST sobre la región estuarina de la costa uruguaya. Mediante experimentos pudo demostrarse el rol principal del viento en la generación de surgencias y secundario de las descargas de agua proveniente del Río de la Plata. Finalmente, la importancia relativa del rol de la topografía y orientación de la costa en el desarrollo de surgencias demostrado y estudiado para otras regiones (Song et al., 2004; Gan et al., 2007; Chen et al., 2013; Wang et al., 2013), así como también sugerido para la costa uruguaya (Pimenta et al., 2008) no fueron evaluados en este trabajo. En este sentido, las simulaciones numéricas son herramientas ideales para evaluar estos efectos, por lo cual sería interesante que futuros trabajos los consideraran.

El transporte superficial en la zona costera uruguaya ha sido investigado por primera vez mediante la aplicación de la técnica de Exponentes de Lyapunov

de Tamaños Finitos (FSLE) sobre el campo de velocidad superficial obtenida de las simulaciones numéricas. Los promedios temporales de FSLE son indicadores de la turbulencia horizontal, y permitieron diferenciar la región costera uruguaya de regiones alejadas de la costa durante el verano, en función de las propiedades de mezcla horizontal. La intensa mezcla en la región costera oceánica durante el verano, así como su aumento durante las fechas en que se registraron eventos de surgencia intensa, posiblemente posea consecuencias ecológicas con importancia de ser estudiadas.

El análisis de FSLE reveló la presencia de Estructuras Coherentes Lagrangianas (LCS) concentradas frente a la costa uruguaya que se reorganizan, se juntan, separan y migran hacia mar adentro durante la evolución de eventos de surgencia intensa. Su importancia en el transporte de partículas fue verificada mediante la liberación de trazadores sintéticos que siguieron las líneas de LCS. Así se sugirió que el transporte producido por las líneas posiblemente tenga implicancias ecológicas, reteniendo y redireccionando el transporte de partículas en suspensión, nutrientes, y organismos planctónicos durante eventos de surgencia intensa, con consecuencias a diferentes niveles ecológicos.

En este sentido, es reconocido que las regiones en que ocurren surgencias costeras son en general zonas biológicamente productivas (Pauly & Christensen, 1995; Kämpf & Chapman, 2016) y que asociadas a ellas se desarrollan frentes, áreas de retención y *eddies* que interactúan con la distribución espacial de los organismos planctónicos modulando la estructura y biomasa de los ecosistemas (Oschlies and Garçon, 1998; Mackas et al., 2005). En la región costera uruguaya, las implicancias ecológicas de las surgencias no han sido previamente estudiadas.

Considerando lo anterior; y como primera aproximación al estudio de las implicancias ecológicas de las LCS relacionadas a los procesos de surgencia

sobre las comunidades biológicas, se relacionó la posición de las LCS con la posición de la flota industrial pesquera Categoría B durante fechas puntuales de surgencia y durante la evolución de un evento de surgencia intensa. Se comprobó que la flota se localizó en general en posiciones concordantes con los frentes de convergencia, tanto con los relacionados a la surgencia como con el frente relacionado a la descargas del Río de la Plata, sugiriendo así una relación entre los procesos de retención y la ubicación de los recursos pesqueros.

En esta línea, sería de utilidad el análisis de información sobre la posición de la flota pesquera durante períodos mayores de tiempo que exclusivamente los 9 días correspondientes a un evento de surgencia particular. De esta manera, sería posible relacionar la posición media de la flota durante las actividades de pesca con las áreas de mayor turbulencia horizontal y realizar así inferencias ecológicas sobre el efecto de los procesos de turbulencia horizontal en la posición de los recursos pesqueros. Adicionalmente se podría relacionar las actividades de pesca con otros eventos de surgencia, así como con eventos en los que no ocurre surgencia intensa, de manera de realizar una evaluación completa sobre el rol de los frentes de convergencia en la localización de los recursos pesqueros. Así la aproximación Lagrangiana podría constituir una herramienta útil al servicio de la gestión de los recursos pesqueros para el área marina uruguaya.

Finalmente, considerando la cantidad y diversidad de actividades humanas que ocurren en la costa uruguaya y su área marina adyacente adicionales a pesca (e.g. exploración de hidrocarburos, transporte, turismo), la aplicación de aproximaciones numéricas, Lagrangianas y la técnica de FSLE en particular, son herramientas importantes que estudios de impacto, de planificación ambiental y de diseño de áreas marinas protegidas deberían incluir para una adecuada gestión ambiental del área costera y marina uruguaya.

REFERENCIAS

- Acha, E. M., Mianzan, H. W., Guerrero, R. A., Favero, M., & Bava, J. (2004). Marine fronts at the continental shelves of austral South America: physical and ecological processes. *Journal of Marine systems*, 44(1-2), 83-105.
- Acha, E.M., Mianzan, H., Guerrero, R.J.C., Giberto, D., Montoya, N., Carignan, M., 2008. An overview of physical and ecological processes in the Rio de la Plata Estuary. *Cont. Shelf Res.* 28, Large Largier 1579–1588.
- Acha, E. M., Piola, A., Iribarne, O., & Mianzan, H. (2015). *Ecological processes at marine fronts: oases in the ocean.* Springer.
- Amante, C., & Eakins, B. W. (2008). ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis: Washington. DC (DOC/NOAA/NESDIS/NGDC).
- Artale, V., Boffetta, G., Celani, A., Cencini, M., & Vulpiani, A. (1997). Dispersion of passive tracers in closed basins: Beyond the diffusion coefficient. *Physics of Fluids*, 9(11), 3162-3171.
- Aurell, E., Boffetta, G., Crisanti, A., Paladin, G., & Vulpiani, A. (1997). Predictability in the large: an extension of the concept of Lyapunov exponent. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 30(1), 1.
- Barnier, B., Siefridt, L., & Marchesiello, P. (1995). Thermal forcing for a global ocean circulation model using a three-year climatology of ECMWF analyses. *Journal of Marine Systems*, 6(4), 363-380.

- Barreiro, M. (2010). Influence of ENSO and the South Atlantic Ocean on climate predictability over Southeastern South America. *Climate dynamics*, 35(7-8), 1493-1508.
- Barreiro, M. (2017). Interannual variability of extratropical transient wave activity and its influence on rainfall over Uruguay. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4261-4274.
- Beron-Vera, F. J., Olascoaga, M. J., & Goni, G. J. (2008). Oceanic mesoscale eddies as revealed by Lagrangian coherent structures. *Geophysical Research Letters*, 35(12).
- Berta, M., Ursella, L., Nencioli, F., Doglioli, A. M., Petrenko, A. A., & Cosoli, S. (2014). Surface transport in the Northeastern Adriatic Sea from FSLE analysis of HF radar measurements. *Continental Shelf Research*, 77, 14-23.
- Blumberg, A. F., & Mellor, G. L. (1987). A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. *Three-dimensional coastal ocean models*, 4, 1-16.
- Boffetta, G., Lacorata, G., Redaelli, G., & Vulpiani, A. (2001). Detecting barriers to transport: a review of different techniques. *Physica D*, 159:58–70.
- Borús, J., 2019. Evaluación de caudales diarios descargados por los grandes ríos del sistema del Plata al Río de la Plata. Dirección de Sistemas de Información y Alerta Hidrológico Instituto Nacional del Agua, Ezeiza, Argentina.
- Brandini, F. P., Boltovskoy, D., Piola, A., Kocmur, S., Röttgers, R., Abreu, P. C., & Lopes, R. M. (2000). Multiannual trends in fronts and distribution of nutrients and chlorophyll in the southwestern Atlantic (30–62 S). *Deep*

Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 47(6), 1015-1033.

Budyansky, M. V., Goryachev, V. A., Kaplunenko, D. D., Lobanov, V. B., Prants, S. V., Sergeev, A. F., ... & Uleysky, M. Y. (2015). Role of mesoscale eddies in transport of Fukushima-derived cesium isotopes in the ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 96, 15-27.

Campos, E. J., Lentini, C. A., Miller, J. L., & Piola, A. R. (1999). Interannual variability of the sea surface temperature in the South Brazil Bight. *Geophysical Research Letters*, 26(14), 2061-2064.

Carton, J. A., & Giese, B. S. (2008). A reanalysis of ocean climate using Simple Ocean Data Assimilation (SODA). *Monthly Weather Review*, 136(8), 2999-3017.

Casey, K. S., & Cornillon, P. (1999). A comparison of satellite and in situ-based sea surface temperature climatologies. *Journal of Climate*, 12(6), 1848-1863.

Castro, B. M., Brandini, F. P., Pires-Vanin, A. M. S., & Miranda, L. B. (2006). Multidisciplinary oceanographic processes on the Western Atlantic continental shelf between 4 N and 34 S. *The sea*, 11, 209-251.

Cazes-Boezio, G., Robertson, A. W., & Mechoso, C. R. (2003). Seasonal dependence of ENSO teleconnections over South America and relationships with precipitation in Uruguay. *Journal of Climate*, 16(8), 1159-1176.

Chelton, D. B., Schlax, M. G., Witter, D. L., & Richman, J. G. (1990). Geosat altimeter observations of the surface circulation of the Southern Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 95(C10), 17877-17903.

- Chen, Z., Yan, X. H., Jiang, Y., & Jiang, L. (2013). Roles of shelf slope and wind on upwelling: A case study off east and west coasts of the US. *Ocean Modelling*, 69, 136-145.
- Chin, T. M., Vazquez-Cuervo, J., & Armstrong, E. M. (2017). A multi-scale high-resolution analysis of global sea surface temperature. *Remote sensing of environment*, 200, 154-169.
- Ciotti, Á. M., Odebrecht, C., Fillmann, G., & Moller Jr, O. O. (1995). Freshwater outflow and Subtropical Convergence influence on phytoplankton biomass on the southern Brazilian continental shelf. *Continental shelf research*, 15(14), 1737-1756.
- Combes, V., & Matano, R. P. (2014). A two-way nested simulation of the oceanic circulation in the Southwestern Atlantic. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(2), 731-756.
- Combes, V., & Matano, R. P. (2018). The Patagonian shelf circulation: Drivers and variability. *Progress in oceanography*, 167, 24-43.
- Conkright, M. E., Locarnini, R. A., Garcia, H. E., O'Brien, T. D., Boyer, T. P., Stephens, C., & Antonov, J. I. (2002). World Ocean Atlas 2001: Objective analyses, data statistics, and figures: CD-ROM documentation.
- Cotté C., d'Ovidio F., Dragon A.-C., Guinet C., Lévy M. (2015). "Flexible preference of southern elephant seals for distinct mesoscale features within the Antarctic Circumpolar Current", *Prog. in Ocean.*, 131, 46–58.
- Cummings, J. A., & Smedstad, O. M. (2013). Variational data assimilation for the global ocean. In *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications (Vol. II)* (pp. 303-343). Springer, Berlin, Heidelberg.

- da Silva, A. M., Young, C. C., & Levitus, S. (1994). Atlas of surface marine data 1994, Vol. 1, algorithms and procedures, NOAA Atlas NESDIS 6, U. S. Department of Commerce, NOAA, NESDIS, USA, 74 pp.
- de Mello, C., Barreiro, M., Ortega, L., Trinchin, R., & Manta, G. (2022). Coastal upwelling along the Uruguayan coast: Structure, variability and drivers. *Journal of Marine Systems*, 230, 103735.
- Dogliotti, A. I., Gossn, J. I., Gonzalez, C., Yema, L., Sanchez, M., & O'Farrell, I. L. (2021, July). Evaluation of Multi-and Hyper-Spectral Chl-A Algorithms in the Río De La Plata Turbid Waters During a Cyanobacteria Bloom. In 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS (pp. 7442-7445). IEEE.
- d'Ovidio, F., Fernández, V., Hernández-García, E., & López, C. (2004). Mixing structures in the Mediterranean Sea from finite-size Lyapunov exponents. *Geophysical Research Letters*, 31(17).
- d'Ovidio, F., Isern-Fontanet, J., López, C., Hernández-García, E., & García-Ladona, E. (2009). Comparison between Eulerian diagnostics and finite-size Lyapunov exponents computed from altimetry in the Algerian basin. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 56(1), 15-31.
- d'Ovidio, F., De Monte, S., Alvain, S., Dandonneau, Y., & Lévy, M. (2010). Fluid dynamical niches of phytoplankton types. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(43), 18366-18370.
- D'Onofrio, E. E., Fiore, M. M., & Romero, S. I. (1999). Return periods of extreme water levels estimated for some vulnerable areas of Buenos Aires. *Continental Shelf Research*, 19(13), 1681-1693.

- Framiñan, M. B., M. P. Etala, E. M. Acha, R. A. Guerrero, C. A. Lasta, and O. B. Brown (1999), Physical characteristics and processes of the Río de la Plata Estuary, in *Estuaries of South America: Their Morphology and Dynamics*, edited by G. M. E. Perillo, M. C. Piccolo, and M. P. Quivira, pp. 161–194, Springer, Berlin.
- Debreu, L., Marchesiello, P., Penven, P., & Cambon, G. (2012). Two-way nesting in split-explicit ocean models: Algorithms, implementation and validation. *Ocean Modelling*, 49, 1-21.
- El Aouni, A., Daoudi, K., Yahia, H., Minaoui, K., & Benazzouz, A. (2019). Surface mixing and biological activity in the North-West African upwelling. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 29(1), 011104.
- Framiñan, M. B., Etala, M. P., Acha, E. M., Guerrero, R. A., Lasta, C. A., & Brown, O. B. (1999). Physical characteristics and processes of the Río de la Plata estuary. In *Estuaries of South America* (pp. 161-194). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Freeland, H. J. and K. L. Denman. 1982. A topographically controlled upwelling center off southern Vancouver Island. *J. Mar. Res.*, 40, 1069–1093.
- Gaines, B. J., Kuklinski, J. H., Quirk, P. J., Peyton, B., & Verkuilen, J. (2007). Same facts, different interpretations: Partisan motivation and opinion on Iraq. *The Journal of Politics*, 69(4), 957-974.
- Galan, A., Orfila, A., Simarro, G., Hernández-Carrasco, I., & Lopez, C. (2012). Wave mixing rise inferred from Lyapunov exponents. *Environmental fluid mechanics*, 12(3), 291-300.}

- García-Olivares, A., Isern-Fontanet, J., & García-Ladona, E. (2007). Dispersion of passive tracers and finite-scale Lyapunov exponents in the Western Mediterranean Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 54(2), 253-268.
- Grobbelaar, J. U. (1985). Phytoplankton productivity in turbid waters. *Journal of Plankton Research*, 7(5), 653-663.
- Guerrero, R.A., Acha, E.M., Framin, M.B., Lasta, C.A., 1997a. Physical oceanography of the Río de la Plata Estuary, Argentina. *Cont. Shelf Res.* 17 (7), 727–742.
- Guerrero, R.A., Lasta, C.A., Acha, E.M., Mianzan, H.W. and Framiñan, M.B., 1997b. Atlas Hidrográfico del Río de la Plata. Comisión Administradora del Río de la Plata – Instituto Nacional de Investigaciones y Desarrollo Pesquero. Buenos Aires - Montevideo, pp 190. I.S.B.N. no 950-99583-1-X.
- Guerrero, R.A., Piola, A.R., Molinari, G.N., Osiroff, A.P. and Jáuregui, S.I., 2010. Climatología de temperatura y salinidad en el Río de la Plata y su Frente Marítimo. Argentina-Uruguay. Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero, Contribución no 1555. Mar del Plata, ISBN. 978-987-1443-03-1.
- Haller, G., & Yuan, G. (2000). Lagrangian coherent structures and mixing in two-dimensional turbulence. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 147(3-4), 352-370.
- Haller, G. (2001). Distinguished material surfaces and coherent structures in three-dimensional fluid flows. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 149(4), 248-277.

- Haney, R. L. (1991). On the pressure gradient force over steep topography in sigma coordinate ocean models. *Journal of physical Oceanography*, 21(4), 610-619.
- Hernández-Carrasco, I., López, C., Hernández-García, E., & Turiel, A. (2011). How reliable are finite-size Lyapunov exponents for the assessment of ocean dynamics?. *Ocean Modelling*, 36(3-4), 208-218.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... & Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049.
- Hickey, B. M. (1997). The response of a steep-sided, narrow canyon to time-variable wind forcing. *Journal of Physical Oceanography*, 27(5), 697-726.
- Hyrenbach, K. D., Forney, K. A., & Dayton, P. K. (2000). Marine protected areas and ocean basin management. *Aquatic conservation: marine and freshwater ecosystems*, 10(6), 437-458.
- Johnson, D. R. (1977). Determining vertical velocities during upwelling off the Oregon coast. *Deep Sea Research*, 24(2), 171-180.
- Joseph, B., & Legras, B. (2002). Relation between kinematic boundaries, stirring, and barriers for the Antarctic polar vortex. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59(7), 1198-1212.
- Kai, E. T., Rossi, V., Sudre, J., Weimerskirch, H., Lopez, C., Hernandez-Garcia, E., ... & Garçon, V. (2009). Top marine predators track Lagrangian coherent structures. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(20), 8245-8250.

- Kämpf, J., & Chapman, P. (2016). Upwelling systems of the world (pp. 31-42). Springer International Publishing Switzerland.
- Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S-K., Hnilo, J.J., Fiorino, M., Potter, G.L. 1631-1643, Nov 2002, Bulletin of the American Meteorological Society.
- Kang, Y. S., Choi, H. C., Lim, J. H., Jeon, I. S., & Seo, J. H. (2005). Dynamics of the phytoplankton community in the coastal waters of Chuksan harbor, East Sea. *Algae*, 20(4), 345-352.
- Kinlan, B. P., & Gaines, S. D. (2003). Propagule dispersal in marine and terrestrial environments: a community perspective. *Ecology*, 84(8), 2007-2020.
- Karrasch, D., & Haller, G. (2013). Do finite-size Lyapunov exponents detect coherent structures?. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 23(4), 043126.
- Koh, T. Y., & Legras, B. (2002). Hyperbolic lines and the stratospheric polar vortex. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 12(2), 382-394.
- Kool, J. T., Moilanen, A., & Treml, E. A. (2013). Population connectivity: recent advances and new perspectives. *Landscape Ecology*, 28(2), 165-185.
- Kromkamp, J., & Peene, J. (1999). Estimation of phytoplankton photosynthesis and nutrient limitation in the Eastern Scheldt estuary using variable fluorescence. *Aquatic Ecology*, (1).
- Kowalewski, M., & Ostrowski, M. (2005). Coastal up-and downwelling in the southern Baltic. *Oceanologia*, 47(4).

- Large, W. G., McWilliams, J. C., & Doney, S. C. (1994). Oceanic vertical mixing: A review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization. *Reviews of geophysics*, 32(4), 363-403.
- Largier J. L. 2020. Upwelling Bays: How Coastal Upwelling Controls Circulation, Habitat, and Productivity in Bays. *Annual Review of Marine Science*. Jan;12:415-447. DOI: 10.1146/annurev-marine-010419-011020.
- Lehahn, Y., d'Ovidio, F., Lévy, M., & Heifetz, E. (2007). Stirring of the northeast Atlantic spring bloom: A Lagrangian analysis based on multisatellite data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C8).
- Lellouche, J. M., Le Galloudec, O., Greiner, E., Garric, G., Regnier, C., Drevillon, M., & Le Traon, P. Y. (2018, February). The Copernicus Marine Environment Monitoring Service global ocean 1/12? physical reanalysis GLORYS12V1: description and quality assessment. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (Vol. 20, p. 19806)
- Mackas, D. L., Tsurumi, M., Galbraith, M. D., & Yelland, D. R. (2005). Zooplankton distribution and dynamics in a North Pacific Eddy of coastal origin: II. Mechanisms of eddy colonization by and retention of offshore species. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 52(7-8), 1011-1035.
- Mackas, D. L., Peterson, W. T., Ohman, M. D., & Lavaniegos, B. E. (2006). Zooplankton anomalies in the California Current system before and during the warm ocean conditions of 2005. *Geophysical Research Letters*, 33(22).
- Mancho, A. M., Hernández-García, E., Small, D., Wiggins, S., & Fernández, V. (2008). Lagrangian transport through an ocean front in the

- Northwestern Mediterranean Sea. *Journal of Physical Oceanography*, 38(6), 1222-1237.
- Manta, G., de Mello, S., Trinchin, R., Badagian, J., & Barreiro, M. (2018). The 2017 record marine heatwave in the southwestern Atlantic shelf. *Geophysical Research Letters*, 45(22), 12-449.
- Martínez, A., Ortega, L., 2015. Delimitation of domains in the external Río de la Plata estuary, involving phytoplanktonic and hydrographic variables. *Braz. J. Oceanogr.* 63 (3), 217–227.
- Masumoto, Y., Sasaki, H., Kagimoto, T., Komori, N., Ishida, A., Sasai, Y., ... & Yamagata, T. (2004). A fifty-year eddy-resolving simulation of the world ocean: Preliminary outcomes of OFES (OGCM for the Earth Simulator). *J. Earth Simulator*, 1, 35-56.
- 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(4), 983-995.
- Matano, R. P., Combes, V., Piola, A. R., Guerrero, R., Palma, E. D., Strub, P. T., ... & Saraceno, M. (2014). The salinity signature of the cross-shelf exchanges in the Southwestern Atlantic Ocean: Numerical simulations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(11), 7949-7968.
- McGillicuddy, D. J., Robinson, A. R., Siegel, D. A., Jannasch, H. W., Johnson, R., Dickey, T. D., ... & Knap, A. H. (1998). Influence of mesoscale eddies on new production in the Sargasso Sea. *Nature*, 394(6690), 263-266.
- Meccia, V.L., Simionato, C.G., Guerrero, R.A., 2013. The Rio de la Plata Estuary response to wind variability in synoptic timescale: salinity fields and salt wedge structure. *J. Coast. Res.* 29 (1), 61–77.

- Molcard, A., Poje, A. C., & Özgökmen, T. M. (2006). Directed drifter launch strategies for Lagrangian data assimilation using hyperbolic trajectories. *Ocean Modelling*, 12(3-4), 268-289.
- Möller Jr, O. O., Piola, A. R., Freitas, A. C., & Campos, E. J. (2008). The effects of river discharge and seasonal winds on the shelf off southeastern South America. *Continental shelf research*, 28(13), 1607-1624.
- Moore II, T. S., Matear, R. J., Marra, J., & Clementson, L. (2007). Phytoplankton variability off the Western Australian Coast: Mesoscale eddies and their role in cross-shelf exchange. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 54(8-10), 943-960.
- Morel, X., Lucas, M. A., & Dos Santos, F. (2014). A Lagrangian study of the Brazil-Malvinas confluence: Lagrangian coherent structures and several Lyapunov exponents. *Journal of Operational Oceanography*, 7(2), 13-23.
- Nagy, G. J., Gómez-Erache, M., López, C. H., & Perdomo, A. C. (2002). Distribution patterns of nutrients and symptoms of eutrophication in the Rio de la Plata River Estuary System. In *Nutrients and eutrophication in estuaries and coastal waters* (pp. 125-139). Springer, Dordrecht.
- Nieblas, A. E., Drushka, K., Reygondeau, G., Rossi, V., Demarcq, H., Dubroca, L., & Bonhommeau, S. (2014). Defining Mediterranean and Black Sea biogeochemical subprovinces and synthetic ocean indicators using mesoscale oceanographic features. *PloS one*, 9(10), e111251.
- Olascoaga, M. J., Rypina, I. I., Brown, M. G., Beron-Vera, F. J., Kocak, H., Brand, L. E., ... & Shay, L. K. (2006). Persistent transport barrier on the West Florida Shelf. *Geophysical research letters*, 33(22).

- Olascoaga, M. J., Beron-Vera, F. J., Brand, L. E., & Kocak, H. (2008). Tracing the early development of harmful algal blooms on the West Florida Shelf with the aid of Lagrangian coherent structures. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C12).
- Olascoaga, M. J. (2010). Isolation on the West Florida Shelf with implications for red tides and pollutant dispersal in the Gulf of Mexico. *Nonlinear processes in geophysics*, 17(6), 685-696.
- Olson, R. J., Sosik, H. M., Chekalyuk, A. M., & Shalapyonok, A. (2000). Effects of iron enrichment on phytoplankton in the Southern Ocean during late summer: active fluorescence and flow cytometric analyses. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 47(15-16), 3181-3200.
- Ortega, L. & Martínez, A. 2007. Multiannual and seasonal variability of water masses and fronts over the Uruguayan shelf. *Journal of Coastal Research*, 21:219-231.
- Oschlies, A., & Garçon, V. (1998). Eddy-induced enhancement of primary production in a model of the North Atlantic Ocean. *Nature*, 394(6690), 266-269.
- Owen, R. W. (1981). Fronts and eddies in the sea: mechanisms, interactions and biological effects. *Analysis of marine ecosystems*, 197-233.
- Özgökmen, T. M., Griffa, A., Mariano, A. J., & Piterbarg, L. I. (2000). On the predictability of Lagrangian trajectories in the ocean. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 17(3), 366-383.1994
- Peikert, R., Pobitzer, A., Sadlo, F., & Schindler, B. (2014). A comparison of finite-time and finite-size Lyapunov exponents. In *Topological Methods in Data Analysis and Visualization III* (pp. 187-200). Springer, Cham.

- Pérez-Muñuzuri, V., & Huhn, F. (2010). The role of mesoscale eddies time and length scales on phytoplankton production. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 17(2), 177-186.
- Pimenta, F., Garvine, R. W., & Münchow, A. (2008). Observations of coastal upwelling off Uruguay downshelf of the Plata estuary, South America. *Journal of Marine Research*, 66(6), 835-872.
- Piola, A. R., & Gordon, A. L. (1989). Intermediate waters in the southwest South Atlantic. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 36(1), 1-16.
- Piola, A. R., Campos, E. J., Möller Jr, O. O., Charo, M., & Martinez, C. (2000). Subtropical shelf front off eastern South America. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 105(C3), 6565-6578.
- Piola, A. R., Matano, R. P., Palma, E. D., Möller Jr, O. O., & Campos, E. J. (2005). The influence of the Plata River discharge on the western South Atlantic shelf. *Geophysical Research Letters*, 32(1).
- Piola, A. R., Romero, S. I., & Zajaczkovski, U. (2008). Space–time variability of the Plata plume inferred from ocean color. *Continental Shelf Research*, 28(13), 1556-1567.
- Prants, S. V., Budyansky, M. V., & Uleysky, M. Y. (2014). Identifying Lagrangian fronts with favourable fishery conditions. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 90, 27-35.
- Prants, S. V., Budyansky, M. V., Uleysky, M. Y., & Kulik, V. V. (2021). Lagrangian fronts and saury catch locations in the Northwestern Pacific in 2004–2019. *Journal of Marine Systems*, 222, 103605.
- Rabellino, J. (2016). Análisis del rol del Frente Subtropical de Plataforma sobre huevos y larvas de *Engraulis anchoita* utilizando un enfoque

bio-físico. Tesis para la obtención del título de Maestría en PEDECIBA Geociencias, Facultad de Ciencias, UdelaR.

- Rossi, V., López, C., Sudre, J., Hernández-García, E., & Garçon, V. (2008). Comparative study of mixing and biological activity of the Benguela and Canary upwelling systems. *Geophysical Research Letters*, 35(11).
- Rossi, V., López, C., Hernández-García, E., Sudre, J., Garçon, V., & Morel, Y. (2009). Surface mixing and biological activity in the four Eastern Boundary Upwelling Systems. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 16(4), 557-568.
- Rossi, V., Ser-Giacomi, E., López, C., & Hernández-García, E. (2014). Hydrodynamic provinces and oceanic connectivity from a transport network help designing marine reserves. *Geophysical Research Letters*, 41(8), 2883-2891.
- Saraceno, M., Provost, C., & Piola, A. R. (2005). On the relationship between satellite-retrieved surface temperature fronts and chlorophyll a in the western South Atlantic. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C11).
- Sepúlveda, H. H., Valle-Levinson, A., & Framiñan, M. B. (2004). Observations of subtidal and tidal flow in the Río de la Plata estuary. *Cont. Shelf Res.*, 24, 509-525.
- Shanks, A. L., Grantham, B. A., & Carr, M. H. (2003). Propagule dispersal distance and the size and spacing of marine reserves. *Ecological applications*, 13(sp1), 159-169.
- Shchepetkin, A. F., & McWilliams, J. C. (1998). Quasi-monotone advection schemes based on explicit locally adaptive dissipation. *Monthly weather review*, 126(6), 1541-1580.
- Shchepetkin, A. F., & McWilliams, J. C. (2005). The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean modelling*, 9(4), 347-404.

- Siegel, D. A., Mitarai, S., Costello, C. J., Gaines, S. D., Kendall, B. E., Warner, R. R., & Winters, K. B. (2008). The stochastic nature of larval connectivity among nearshore marine populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(26), 8974-8979.
- Simionato, C. G., Nuñez, M. N., & Engel, M. (2001). The salinity front of the Río de la Plata-A numerical case study for winter and summer conditions. *Geophysical Research Letters*, 28(13), 2641-2644.
- Simionato, C. G., Dragani, W., Meccia, V., & Nuñez, M. (2004). A numerical study of the barotropic circulation of the Río de la Plata estuary: sensitivity to bathymetry, the Earth's rotation and low frequency wind variability. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 61(2), 261-273. DOI: 0.1016/j.ecss.2004.05.005
- Simionato, C. G., Vera, C. S., y Siegismund, F. (2005). Surface wind variability on seasonal and interannual scales over Río de la Plata area. En: *Journal of Coastal Research*, 21(4), 770-783. DOI: 10.2112/008-NIS.1
- Simionato, C.G., Berasategui, A., Meccia, V.L., Acha, M. & Mianzan, H. (2008). Short time-scale wind forced variability in the Río de la Plata Estuary and its role on ichthyoplankton retention. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76(2), 211-226.
- Simionato, C.G., Tejedor, M.L.C., Campetella, C., Guerrero, R., Moreira, D., (2010). Patterns of sea surface temperature variability on seasonal to sub-annual scales at and offshore the Río de la Plata estuary. *Cont. Shelf Res.* 30 (19), 1983–1997.
- Simionato, C. G. & Nuñez, M. N. (2015). Estudio numérico de variabilidad invierno – verano en el frente superficial de salinidad del Río de la Plata.
- Song, Y.; & Haidvogel, D. (1994) "A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate system," *Journal of Computational Physics*, vol. 115, no. 1, pp. 228–244.
- Storto, A., Masina, S., & Dobricic, S. (2014). Estimation and impact of nonuniform horizontal correlation length scales for global ocean physical analyses. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 31(10), 2330-2349.

- Strub, P. T., James, C., Combes, V., Matano, R. P., Piola, A. R., Palma, E. D., ... & Ruiz-Etcheverry, L. A. (2015). Altimeter-derived seasonal circulation on the southwest Atlantic shelf: 27°–43° S. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(5), 3391-3418.
- Treml, E. A., Roberts, J. J., Chao, Y., Halpin, P. N., Possingham, H. P., & Riginos, C. (2012). Reproductive output and duration of the pelagic larval stage determine seascape-wide connectivity of marine populations.
- Trinchin, R., Ortega, L., & Barreiro, M. (2019). Spatiotemporal characterization of summer coastal upwelling events in Uruguay, South America. *Regional Studies in Marine Science*, 31, 100787.
- Trinchin, R., Manta, G., Santana, R., Rubio, L., Horta, S., Passadore, C., ... & Barreiro, M. (2021). Hacia un monitoreo continuo de variables oceanográficas en el Parque Nacional Isla de Flores, Uruguay. *Innotec*, (21).
- Tomczak, M., & Godfrey, J. S. (2003). *Regional oceanography: an introduction*. Daya books.
- Wallace, J. M., Smith, C., & Bretherton, C. S. (1992). Singular value decomposition of wintertime sea surface temperature and 500-mb height anomalies. *Journal of climate*, 5(6), 561-576.
- Wang, D., Shu, Y., Xue, H., Hu, J., Chen, J., Zhuang, W., ... & Xu, J. (2014). Relative contributions of local wind and topography to the coastal upwelling intensity in the northern South China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(4), 2550-2567.
- Wiggins, S.: *Chaotic Transport in Dynamical Systems*, Springer Verlag, New York, 1992
- Xie, L., Pallàs-Sanz, E., Zheng, Q., Zhang, S., Zong, X., Yi, X., & Li, M. (2017). Diagnosis of 3D vertical circulation in the upwelling and frontal zones east of Hainan Island, China. *Journal of Physical Oceanography*, 47(4), 755-774.

