



DEPARTAMENTO DE GEOFISICA
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
UNIVERSIDAD DE CONCEPCION, CHILE



DETECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE FILAMENTOS DE
SURGENCIA EN LA ZONA NORTE DE CHILE (15 - 35 °S)
OSVALDO ARTAL ARRIETA

Tesis de pregrado para optar al título profesional de geofísico

Profesor Supervisor:
Dr. ANDRES SEPÚLVEDA

Concepción, Chile. 7 Diciembre 2010.



DEPARTAMENTO DE GEOFISICA
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
UNIVERSIDAD DE CONCEPCION, CHILE



DETECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE FILAMENTOS DE
SURGENCIA EN LA ZONA NORTE DE CHILE (15 - 35 °S)
OSVALDO ARTAL ARRIETA

Miembros del Comité:

Dr. ANDRES SEPÚLVEDA ALLENDE

Dr. DOMINGO MERY

Dr. DANTE FIGUEROA

Tesis de pregrado para optar al título profesional de geofísico
Concepción, Chile. 7 Diciembre 2010.

Índice general

Agradecimientos	III
Índice de figuras	IX
Índice de tablas	XI
Glosario	XIII
Resumen	XV
Abstract	1
1. Introducción	3
2. Hipótesis y Objetivos	9
2.1. Objetivo General	9
2.2. Hipótesis	9
3. Material y Métodos	11
3.1. Configuración de ROMS_AGRIF	13
3.2. Descripción método asistido	15
3.3. Descripción método automático	17
4. Resultados	27
4.1. Descripción simulaciones	27
4.2. Método experto vs automático	29
4.2.1. Costos computacionales y tiempo dedicado	29
4.2.2. Identificación del nacimiento de los filamentos	32
4.2.3. Distribución espacial de los filamentos	32
4.2.4. Distribución temporal de los filamentos	33
4.3. Sensibilidad ROMS en la formación de filamentos de surgencia	33
4.3.1. Variabilidad cantidad de filamentos	36
4.3.2. Variabilidad extensión de filamentos	40
4.3.3. Variabilidad persistencia promedio de filamentos	43
5. Discusión	49
A. ROMS_AGRIF	53
A.1. Ecuaciones de movimiento	53

B. Surgencia Costera	57
B.0.1. Esfuerzo del Viento	60
C. Morfología Matemática	65
D. Análisis EOFs	69
Bibliografía	76

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado gracias al financiamiento del proyecto Fondecyt 11080245. Agradezco a los Departamentos de Física y Geofísica (DGEO) de la Universidad de Concepción por la formación teórica y práctica en las diferentes temáticas de la física en las ciencias de la Tierra y al Grupo de Inteligencia de Maquina (GRIMA) de la Universidad Católica de Chile, por su ayuda en el desarrollo de técnicas de procesamiento de imágenes.

Agradezco en forma especial también a los profesores del Departamento de Geofísica: Samuel Hormazabal, Aldo Montecinos, Oscar Pizarro y Juan Inzunza por todo el apoyo, las preguntas resueltas y los consejos de vida y profesionales entregados. A Lorenzo Luengo, gran amigo, que me ayudó en optimizar códigos, mejorar figuras o simplemente a desconectarme del computador por un momento. A Marco Correa, por su ayuda en el análisis de EOFs y su interpretación

Finalmente, agradezco a mis padres Osvaldo Artal D. e Irene Arrieta M., por su incondicional apoyo y su confianza que me permitieron sacar adelante mi carrera. Mis hermanas por su alegría y cariño. Mi novia Patricia Campos por su compañía, comprensión y paciencia. Sin ustedes esta tesis nunca se hubiese realizado. Muchas gracias.

El hombre que sabe y sabe lo que sabe, es un sabio, ¡síguelo!. El hombre que no sabe y sabe que no sabe, es simple, ¡enséñale!. El hombre que sabe y no sabe que sabe, está dormido, ¡despiértalo!. El hombre que no sabe y no sabe que no sabe, es un necio, ¡huye de él!.

Proverbio Arabe

Índice de figuras

1.1. Simulación de un filamento de surgencia realizada con ROMS AGRIF en la zona norte de Chile (32 - 35 °S y 71 - 75 °W) con una resolución espacial de 5 km. Las variables graficadas son temperatura y corriente superficial. Se observa una estructura angosta más fría que la zona aledaña que se desplaza mar adentro	6
3.1. a) Grilla horizontal con resolución 1/20 °, corresponde a las coordenadas geográficas 15 - 35 °S y 69 - 80 °W. b) Distribución de capas sigma en la vertical	12
3.2. Esquema de los pasos lógicos utilizados en el método asistido.	14
3.3. Ejemplo de una figura visualizada por el método experto. La gráfica de la izquierda muestra los gradientes horizontales y la de la derecha los contornos de temperatura	16
3.4. Esquema de los pasos lógicos utilizados en el método automático	18
3.5. Paso 1. Ejemplo de imagen de temperatura superficial del mar en escalas de grises. Tonos más oscuros significan temperaturas más frías.	21
3.6. Paso 2. Ejemplo de imagen filtrada de temperatura superficial del mar. Los colores blancos indican gradientes horizontales de temperatura mayores a 2 grados.	22
3.7. Paso 3. Ejemplo de imagen segmentada de temperatura superficial del mar. Cada región es asociada con zonas de diferentes características	23
3.8. Paso 3.1. Ejemplo de un esqueleto morfológico realizado a partir de la imagen segmentada de temperatura superficial del mar.	24
3.9. Paso 4. Ejemplo de identificación de filamentos costeros a partir de la imagen de esqueleto morfológico.	25
4.1. Diagnóstico simulaciones forzadas con climatología COADS (experimento 1). Apreciamos la estabilidad del modelo al segundo año.	28
4.2. Dependencia del radio de tolerancia empleado sobre la cantidad de filamentos de surgencia encontrados en un año de estudio utilizando método asistido y automático. Es posible observar la precisión del método automático en comparación al asistido en determinar el punto de nacimiento del filamento.	30
4.3. Dependencia del tiempo empleado sobre la cantidad de filamentos de surgencia encontrados en un año de estudio utilizando método asistido y automático. Es posible observar la dispersión del método asistido y el ahorro considerable de tiempo al utilizar el método automático.	31

4.4.	Distribución espacial de los filamentos de surgencia. Existe una buena coherencia entre los -18 y -33 $^{\circ}$ rcS, en la zona más al norte el método automático sobrestima y en la zona más al sur subestima.	34
4.5.	Distribución temporal de los filamentos de surgencia. Existe un buen ajuste entre el método automático y la mediana de los identificadores manuales mediante el método asistido los primeros 8 meses. El ajuste de los últimos meses es malo, debido posiblemente al cansancio de las personas que realizaron el conteo.	35
4.6.	Diagnostico promedio superficial de temperatura y salinidad	37
4.7.	Resumen de los principales resultados obtenidos al realizar EOF's entre los τ_x de COADS y QuikSCAT.	38
4.8.	Resumen de los principales resultados obtenidos al realizar EOF's entre los τ_y de COADS y QuikSCAT.	39
4.9.	Distribución espacial del número de filamentos de surgencia	41
4.10.	Distribución temporal del número de filamentos de surgencia	42
4.11.	Distribución espacial del largo promedio de filamentos de surgencia.	44
4.12.	Distribución temporal del largo promedio de filamentos de surgencia.	45
4.13.	Distribución espacial de la persistencia promedio de filamentos de surgencia.	46
4.14.	Distribución temporal de la persistencia promedio de filamentos de surgencia.	47
A.1.	Ubicación de variables sobre una grilla Arakawa-C. La componente zonal de la corriente u se encuentra en la mitad en el centro de los bordes laterales, mientras que la componente meridional se encuentra en el centro de los bordes horizontales. El resto de las variables se encuentran en el centro de la grilla. Figura tomada de la pagina de ROMS (http://roms.mpl.ird.fr)	55
A.2.	Ubicación de variables sobre una grilla vertical escalonada, donde los cuadros corresponden a u , las x a v y los círculos negros el resto de las variables. Cada N corresponde a una capa sigma. Figura tomada de la pagina de ROMS (http://roms.mpl.ird.fr)	56
B.1.	Esquema de surgencia costera en el hemisferio sur. El viento sopla desde el sur generando un esfuerzo del viento mar adentro por efecto Coriolis. Esto se traduce en un transporte superficial de masas de agua en la superficie y un ascenso de aguas subsufaceiales.	61
B.2.	Espiral de Ekman en el hemisferio sur. Podemos notar como las magnitudes y dirección de las velocidades cambian en función de la profundidad. Figura tomada desde ?	62
B.3.	Comparación entre los valores obtenidos de coeficiente de arrastre en función de un viento ficticio entre los 0 y 30 [m/s], una altura de 10 [m] y una temperatura de 15 $^{\circ}$ utilizando las parametrizaciones de Large and Pond (1981), Large et al. (1995) y Smith (1988). En esta tesis, utilizaremos sólo el esquema Large and Pond (1981) para calcular el esfuerzo del viento en las climatologías de COADS y QuikSCAT	63
D.1.	Validación en el tiempo para los componentes principales de EOFs usando τ_x de COADS y QuikSCAT.	70
D.2.	Validación en el espacio para los componentes principales de EOFs usando τ_x de COADS y QuikSCAT.	71

D.3. Validación en la frecuencia para los componentes principales de EOFs usando τ_x de COADS y QuikSCAT.	72
D.4. Validación en el tiempo para los componentes principales de EOFs usando τ_y de COADS y QuikSCAT.	73
D.5. Validación en el espacio para los componentes principales de EOFs usando τ_y de COADS y QuikSCAT.	74
D.6. Validación en la frecuencia para los componentes principales de EOFs usando τ_y de COADS y QuikSCAT.	75

Índice de tablas

1.1. Criterios utilizados para la identificación de filamentos de surgencia	3
3.1. Esquema de las simulaciones realizadas: la primera columna muestra el experimento, la segunda el forzante del viento, la tercera y cuarta columna, el año inicial y final, respectivamente. La resolución espacial de todos los experimentos es aproximadamente de 50 [km] y se utiliza Large and Pond (1981) para estimar el coeficiente de arrastre (C_D) en el esfuerzo del viento	13
3.2. Resumen con las principales características en la configuración del modelo ROMS	13
3.3. Características técnicas del computador utilizado en las simulaciones realizadas con ROMS_AGRIF. Este multi-core pertenece al proyecto FONDECYT 11800245.	15
3.4. Características técnicas del computador utilizado para la implementación del método experto y automático.	17
4.1. Resumen tamaño archivos de los diferentes experimentos	27
4.2. Resumen sobre la cantidad de filamentos encontrados usando como forzantes COADS o QuikSCAT para cada año simulado. La mayor y menor cantidad de filamentos se encontró en el año 9 y 10 usando COADS con 62 y 45 filamentos, respectivamente. La suma acumulativa de los 4 años encuentra 3 filamentos más usando QuikSCAT	36
4.3. Resumen sobre la extensión de filamentos encontrados usando como forzantes COADS o QuikSCAT para cada año simulado.	40
5.1. Resumen de las principales ventajas y desventajas del método asistido para la identificación y extracción de características de filamentos de surgencia	50
5.2. Resumen de las principales ventajas y desventajas del método automático para la identificación y extracción de características de filamentos de surgencia	50

Glosario

Anticiclón del Pacífico Sur Oriental: Es un centro de alta presión que presenta una oscilación estacional, el cual genera un desplazamiento de masas de aire hacia el Ecuador.

Balu: Toolbox de Matlab para reconocimiento de patrones, protegido con licencia GNU.

COADS: Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set. Climatología mensual (0.5 ° de resolución) de parámetros aire-océano derivados de observaciones individuales.

Filamento de Surgencia: Estructura del orden de los 100 km de largo y 10 de ancho que nace en la zona de transición costera y se extiende mar adentro. Presenta temperaturas más frías que su entorno.

GUI: Graphical User Interface. Programa informático que actúa de interfaz de usuario, utilizando un conjunto de imágenes y objetos gráficos para representar la información y acciones disponibles en la interfaz.

MATLAB: MATrix LABoratory. Software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M).

netCDF: Network Common Data Format. Formato estándar de archivos usados en softwares de la comunidad científica, fue creado por UNIDATA.

QuikSCAT: NASA's Quick Scatterometer. Climatología mensual (0.5 ° de resolución) de vientos satelitales recolectados desde Octubre de 1999 y Agosto de 2006.

ROMS: Regional Ocean Model System. Es un modelo numérico oceánico 3-D que trabaja sobre una grilla estructurada Arakawa-C, de superficie libre, que sigue la topografía, hidrostático y que resuelve las ecuaciones primitivas.

Surgencia: Proceso físico-oceanográfico. Consiste en el ascenso de agua subsuperficial a la superficie producto del esfuerzo del viento.

Toolbox: Librerías de funciones asociadas a diferentes aplicaciones (tratamiento de imágenes, lectura de archivos, herramientas estadísticas, etc.)

TSM: Temperatura superficial del mar.

Resumen

En las ciencias del mar, un filamento de surgencia se identifica como una estructura angosta que nace cerca de la costa y que se desplaza mar adentro, presentando temperaturas más frías que su entorno. Su estudio es importante debido a su impacto biológico, pues puede actuar como medio exportador de nutrientes desde la costa al océano abierto, así también como una barrera al movimiento de larvas a lo largo de la costa. La identificación y caracterización de los filamentos, dada su importancia, es complicada debido a dificultades tanto en su observación directa, ya sea mediante mediciones in situ o satelitales o a su correcta representación en modelos numéricos de circulación oceánica.

Estudiamos filamentos de surgencia simulados en la zona norte de Chile ($15 - 35^\circ S$) con el modelo numérico oceánico ROMS. Estacionalmente esta región se ve fuertemente influenciada por surgencia costera debido al aporte con vientos sur favorables para la surgencia, siendo una zona propicia para la formación de filamentos. La formación y sus características obedecen a patrones tanto atmosféricos como oceánicos. La modificación de cualquier parámetro en la configuración del modelo afecta de uno u otro modo la cantidad, extensión y persistencia de los filamentos.

Desarrollamos 2 herramientas con el fin de analizar varios años de simulaciones: método asistido y método automático. El método asistido es un GUI que permite identificar de manera manual los filamentos y extraer ciertas características de manera automática. El método automático en cambio, es un conjunto de rutinas que se basan en técnicas de reconocimiento de patrones que operan sobre imágenes, que nos permiten identificar y caracterizar de manera automática los filamentos.

El trabajo lo separamos en 2 partes: comparación de los métodos desarrollados y estudio de la sensibilidad de ROMS en la formación de filamentos. La comparación consistió en tomar 1 año climatológico (~ 360 imágenes) y analizar la cantidad de filamentos encontrados por ambos métodos. El tiempo empleado por cada experimento asistido fue de 5 a 3 horas aproximadamente y de 3 minutos para el método automático. Ambos métodos obtienen resultados comparables tanto en distribución espacial como temporal.

El análisis de sensibilidad de ROMS consistió en contrastar las salidas del modelo utilizando 2 forzantes diferentes: COADS y QuikSCAT. En total, 1440 imágenes de temperatura superficial del mar (TSM), correspondientes a los períodos entre los años 7 y 10 de las simulaciones. Los resultados analizados con el método automático muestran que las características de los filamentos de surgencia tanto espaciales como temporales son altamente sensibles a las parametrizaciones del modelo usado.

Abstract

In the sciences of the sea, an upwelling filament is identified as a narrow structure that is originated near the shore and displaces into the sea, showing a lower temperature than that of its environment. Its study is important due to its biologic impact, since it may act as an exporter means of nutrients from the coast to the open ocean, as well as a barrier against the movement of larvae along the coast. The identification and characterization of filaments, given its importance, is complex because of various difficulties in its direct observation, whether it be through in situ measurements or satellites or to its correct representation en numeric models of oceanic circulation.

We studied upwelling filaments simulated in the northern zone of Chile (15 - 35 °C) with the ROMS oceanic numeric model. Seasonally this region is greatly influenced by the coastal upwelling due to the contribution with favorable south winds for the upwelling, being a propitious zone for the formation of filaments. The formation and its characteristics are due to both atmospheric and oceanic patterns. The modification of any established parameter in the setting of the model affects, in one way or another, the quantity, extension and persistence of the filaments.

We have developed two tools with in order to analyze many years of simulations: Assisted Method and Automatic Method. The assisted method is a GUI that allows the user to indentify the filaments manually and extract certain characteristics automatically. The automatic method, however, is a conjoin of routines based in pattern-recognition techniques that operate over images, which let us identify and characterize the filaments automatically.

We have separated this work in 2 parts: comparison of the developed methods and study of ROMS sensibility in filaments formation. The comparison consisted in taking a whole climatological year (360 images) and analyzing the quantity of filaments found through both methods. The time spent in each assisted experiment was approximately 5 to 3 hours, while the automatic method took 3 minutes. Both methods obtain comparable results in spatial as well as in temporal distribution.

The analysis of ROMS sensitivity consisted in contrasting the model's output using 2 different forzantes: COADS and QuickSCAT. Overall, 1440 images of sea superficial temperature (SST), corresponding to the period between the seventh and tenth years of the simulations. The results analyzed with the automatic method show that the characteristics of the upwelling filaments are spatially as much as temporally highly sensitive to the parametrizations of the used model.

Capítulo 1

Introducción

Es posible reconocer diferentes estructuras en el océano, con características e importancias biológicas propias. Entre la zona costera y oceánica podemos reconocer y clasificar de manera general 3 tipos (Strub et al., 1991). En términos de transporte, los filamentos de surgencia son flujos puntuales, generados por convergencia cerca de la zona costera. Los remolinos de mesoescala son flujos discretos mar adentro, cuyo transporte es por largos períodos de tiempo, realizándolos principalmente por difusión. Los meandros son flujos continuos entre la costa y el océano abierto. Los nutrientes y biomasa asociados desde el océano costero tienden a permanecer en la parte costera de éstos.

El presente estudio será centrado sólo en filamentos de surgencia. La surgencia es explicada en mayor detalle en la sección apéndice A. Los filamentos de surgencia en el océano costero (Fig. 1.1) son estructuras de aguas frías, ricas en nutrientes, que se proyectan desde la zona de transición costera hacia la región oceánica (Strub et al., 1991, Haidvogel et al., 1991). Se define un filamento como aquella estructura capaz de cumplir 4 condiciones. Las 3 primeras condiciones son tomadas de Brieva (2010), las que corresponden a gradientes mínimos de temperatura de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre el filamento y el exterior, largos mayores de 100 [km] , persistencias en el tiempo mayores a 3 [días] y una cuarta condición que corresponde al nacimiento dentro de los 10 primeros [km] de costa (Tabla 1.1).

Tabla 1.1: Criterios utilizados para la identificación de filamentos de surgencia

Nombre	Condicion
Gradientes horizontales de temperatura	$\nabla_h T > 2^{\circ}$
Largos	$L > 100km$
Persistencia en el tiempo	$P > 3\text{ dias}$
Nacimiento filamentos	$X_0\text{ cercano a la costa}$

Los filamentos pueden considerarse como procesos superficiales, pues poseen características coherentes de temperatura y salinidad, longitudes del orden de 100 [km] , anchos de 10 [km] y profundidades no mayores a 100 [m] (Haidvogel et al., 1991). Se caracterizan por una baja concentración de oxígeno, una baja temperatura y una alta salinidad (Caceres, 1992). Alrededor del filamento existen fuertes gradientes térmicos del orden de $1\text{ }^{\circ}\text{C/Km}$ y al interior es posible reconocer una zona de máxima salinidad, conocida como de corazón del filamento (Ramp et al., 1991).

Las velocidades típicas de corrientes varían entre 30 y 70 [cm/s], siendo más lentos en la zona cercana al punto de nacimiento (Lutjeharms et al., 1991, Ramp et al., 1991). Un balance quasi-geostrófico para los filamentos es sugerido por Dewey et al. (1991), producto de las corrientes fuertes, la variabilidad temporal, la vorticidad positiva más fuerte en el lado frío y la vorticidad negativa más débil en el lado cálido y a su vez se sugiere, una recirculación entre y a lo largo de los filamentos producto de las distribuciones de temperatura y salinidad.

El nacimiento de los filamentos es aproximadamente en el borde de la plataforma continental (Caceres, 1992). Las causas físicas de los mecanismos de formación son diversas: inestabilidades en la surgencia costera, geometría irregular de la línea de costa, topografía de forma variable, variaciones del esfuerzo del viento, interacción con campos mar adentro de remolinos, entre otras (Ramp et al., 1991). Se orientan de manera perpendicular a la dirección del esfuerzo del viento, su tiempo de respuesta a este forzamiento es entre 18 a 48 [horas] y su persistencia en el tiempo va desde los 2 a los 30 [días] (Grob et al., 2003).

Los filamentos son sensibles a los patrones de viento. En primavera pueden ser formados en las etapas de aceleración de los eventos de surgencia donde se concentran altas temperaturas y bajas precipitaciones (Marín et al., 2003) y en invierno producto de variabilidad y anomalías en las descargas de los ríos y subsidencia de aguas oceánicas en la costa (Grob et al., 2003). El esfuerzo del viento produce una fuerte actividad turbulenta limitada a la capa de mezcla superficial (Dewey et al., 1991). Por esta fuerte influencia del viento estacional como forzante se asocia a las estaciones de surgencia con la formación de filamentos y a los meses de verano como mayor cantidad y filamentos más largos (Strub et al., 1991).

A través de los filamentos se producen los mayores intercambios de aguas costeras y oceánicas, producto de la relajación e inhibición del flujo geostrófico durante la surgencia costera, presentando transportes netos de aguas superficiales entre $1 - 4 [Sv]$ (Grob et al., 2003). El tipo de agua de los filamentos dependerá de la fuerza de la surgencia costera, debido a que el mecanismo de generación será distinto. En la zona norte de Chile una surgencia débil producirá un filamento de aguas SAAW (agua sub-antártica) que se caracteriza por una SSM (mínima salinidad superficial) y una surgencia fuerte producirá un filamento de aguas ESSW (agua ecuatorial subsuperficial), alta en salinidad y baja concentración de oxígeno disuelto (Sobarzo and Figueroa, 2001).

Los flujos verticales de masa, calor y materiales biológicos mar adentro son considerados de importancia regional y mundial en los balances físicos y biológicos (Haidvogel et al., 1991). Los filamentos son de gran importancia biológica debido al transporte considerable de volumen de agua con altas concentraciones de nutrientes y clorofila *a* desde la zona costera hacia la zona oceánica (Silva and Valdenegro, 2003). De igual forma, juegan un rol importante como barreras físicas al transporte de larvas a lo largo de la costa al desviar las larvas atrapadas por estos eventos hacia el mar profundo. Dependen de la fuerza de la surgencia, que regulará la dirección y cantidad de biomasa costera en la zona oceánica superficial (Strub et al., 1991). Son biológicamente más productivos que las zonas templadas adyacentes (Caceres, 1992), viéndose disminuidos en presencia del

ENOS o por debilitamientos del viento suroeste (Sobarzo and Figueroa, 2001).

Los flujos verticales de las contribuciones cicloestróficas y la distribución de vorticidad relativa son ejemplos de importantes procesos dinámicos que pueden ser resueltos por observaciones en el tiempo y el espacio (Dewey et al., 1991). Estas observaciones pueden ser por medio de mediciones in situ (Ramp et al., 1991) o por información satelital (Lutjeharms et al., 1991). Utilizar información satelital nos permite describir y/o explicar la dinámica de aguas costeras y oceánicas, dado lo regional o global que pueden ser las mediciones, mientras que los datos in situ, si bien son mediciones más locales, permiten obtener estimaciones de la estructura vertical.

Utilizar modelos numéricos de circulación oceánica se ha convertido en otra alternativa para el estudio de filamentos (Batteen et al., 1992, Brieva, 2010). Cualquier modelo que se desee utilizar para simular filamentos realistas fenomenológicamente debe cumplir con al menos 4 elementos físicos (Haidvogel et al., 1991).

1. Un forzante flujo hacia el Ecuador que surge desde un forzamiento de viento local, como una consecuencia de la circulación oceánica de gran escala.
2. Una fuente de agua fría a lo largo de la costa, producida por la actividad de surgencia.
3. Una topografía con amplitudes finitas en la plataforma continental.
4. Irregularidades en la forma de la línea de costa.

Entre los modelos recientes se encuentra ROMS (Shchepetkin and McWilliams, 2005), modelo hidroestático paralelo, de superficie libre que trabaja sobre una grilla estructurada Arakawa C, que sigue la topografía y resuelve las ecuaciones primitivas (véase apéndice B). Este código fue adaptado por 'Le institut de Recherche pour le développement' (IRD) para realizar modelos anidados (ROMS_AGRIF) y se creó una serie de rutinas de pre y post procesamiento en MATLAB (ROMSTOOLS) para facilitar la creación de simulaciones en ROMS (Penven et al., 2007). Esto último es lo que utilizaremos para simular filamentos de surgencia en la zona norte de Chile ($15 - 35^{\circ}S$) y ver su sensibilidad con respecto al forzante del viento.

El estudio de filamentos de surgencia es un campo que ha sido explorado en Chile durante los últimos años a través de imágenes satelitales (Caceres, 1992, Grob et al., 2003), datos in situ (Marín et al., 2003, Sobarzo and Figueroa, 2001) y/o modelos numéricos (Brieva, 2010). Esta zona es propicia a la formación de surgencia, por ende de filamentos, debido a los episodios de vientos del sur (surazos) controlados por la presencia del anticiclón subtropical del Pacífico sur-oriental (Garreaud and Rutllant, 2006). El anticiclón subtropical es un centro de alta presión que presenta una oscilación estacional, el cual genera un desplazamiento de masas de aire hacia el Ecuador. La intensidad, variabilidad y persistencia de la surgencia es regulada por procesos locales y remotos: esfuerzo del viento, dinámica de Ekman, geostrofia, estratificación, topografía, procesos de mezcla verticales y ondas atrapadas a la costa entre otros.

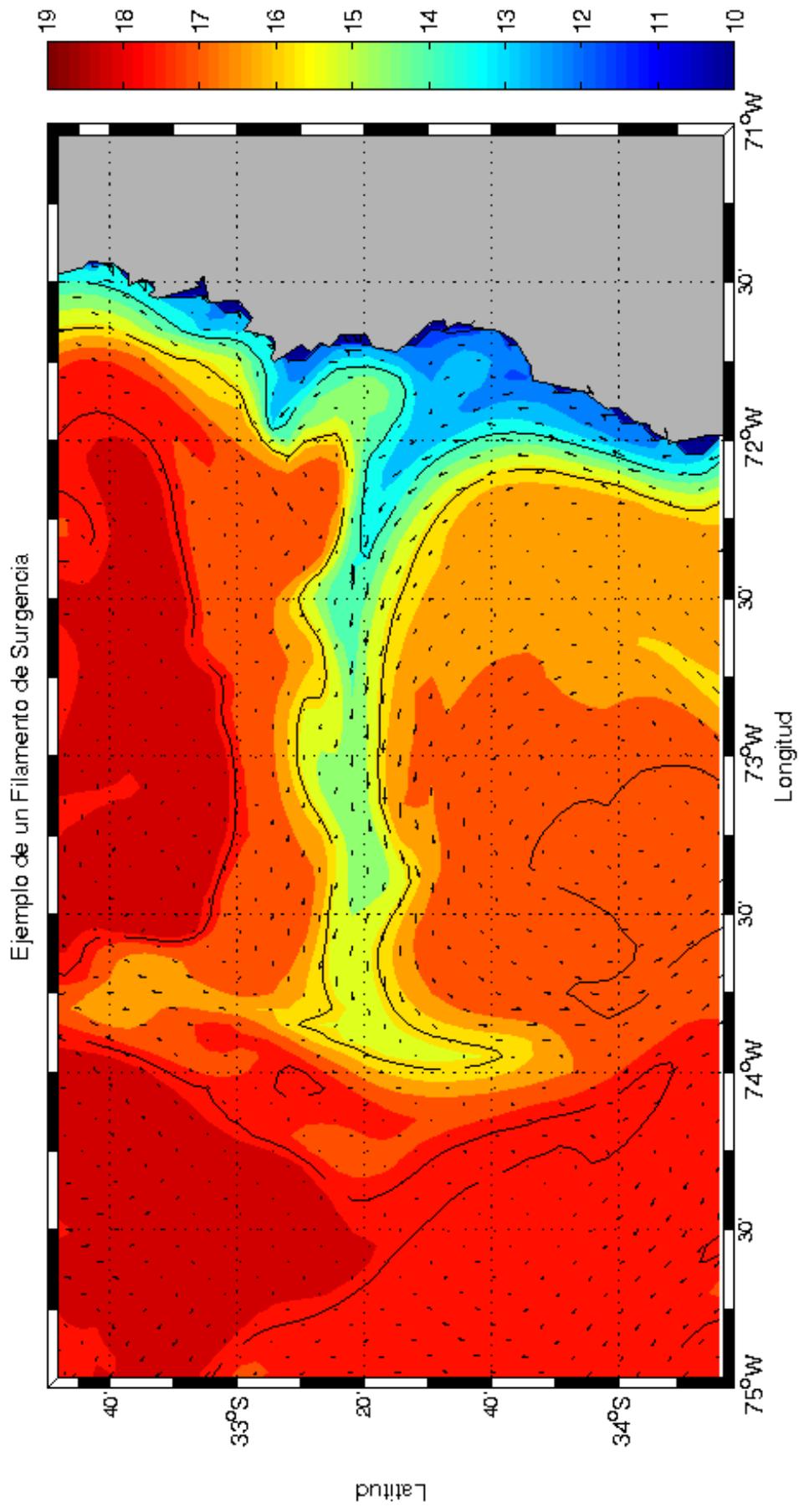


Figura 1.1: Simulación de un filamento de surgencia realizada con ROMS AGRIF en la zona norte de Chile (32 - 35 °S y 71 - 75 °W) con una resolución espacial de 5 km. Las variables graficadas son temperatura y corriente superficial. Se observa una estructura angosta más fría que la zona aledaña que se desplaza mar adentro

Los principales problemas de la identificación y caracterización de filamentos son: las dificultades tanto en su observación directa, ya sea mediante mediciones in situ o satelitales o a su correcta representación en modelos numéricos de circulación oceánica. La subjetividad de cada investigador en su reconocimiento, al no existir una definición de filamentos aceptada. El tiempo empleado en la labor de identificar, caracterizar y analizar cada filamento (días a semanas para unos cuantos meses de datos) producto que esto se realiza de manera manual. Generalmente, se visualizan las imágenes satelitales de TSM en el computador (o se miran las imágenes impresas) y se anotan los filamentos encontrandos en un papel.

El principal resultado de esta tesis es la creación de dos herramientas numéricas diseñadas para facilitar la identificación y extracción de características de filamentos, las que bautizamos como: método asistido y método automático. La principal ventaja de estos métodos es la reducción considerable en los tiempos empleados para esta labor. El método asistido depende del usuario, en promedio se tarda 3 horas, mientras que el metodo automatico hace esta misma labor en 3 minutos, utilizando un computador de escritorio (Tabla 3.4).

El método asistido consiste de una herramienta gráfica de visualización (GUI) que facilita la identificación de los filamentos de manera manual, para posteriormente extraer las características de los filamentos de manera automática. En primera instancia se desarrolló con el fin de contrastar los resultados obtenidos por el método automático, pero luego se decidió que puede ser utilizado como una alternativa para los investigadores reacios con los métodos de detección automáticos.

Utilizar el método asistido es fácil y cualquier persona puede operarlo con unos pocos minutos de entrenamiento. Básicamente se despliega una imagen de TSM, en la cual se deben identificar los puntos de nacimiento y final haciendo con el 'mouse' de la maquina un 'click izquierdo' sobre ellos y para pasar a la siguiente imagen se presionan dos 'clicks' derecho. Internamente, el método guarda una matriz con la información relativa a la fecha de la imagen y las coordenadas geográficas, largo y orientación (esta última no ocupada en los análisis de esta tesis) de cada filamento.

El método automático es una técnica desarrollada para identificar y caracterizar filamentos de surgencia. Se buscó que este fuera fácil de implementar, automático y eficiente. Este método es una adaptación de las técnicas de reconocimiento de patrones, conocidas como visión por computador. Consiste en identificar estructuras y caracterizarlas a partir de una imagen en particular. Para su implementación se utilizó MATLAB con sus toolbox de lectura de archivos NetCDF, procesamiento de imagenes (Gonzalez et al., 2003) y Balu (Mery and Soto, 2008), pero puede ser adaptado a otro lenguaje utilizando toolbox equivalentes. El toolbox Balu puede ser descargado de forma gratuita desde <http://dmery.ing.puc.cl>, mientras que el código desarrollado puede ser solicitado directamente al autor correspondiente. Esta técnica ya se ha implementado en otras áreas, tales como biología (Glasbey and Horgan, 1995), evaluación de materiales (Mery, 2006) o meteorología (Sonka et al., 2008) reconociendo trayectorias de nubes a traves de técnicas como las desarrolladas en Pajares and De la Cruz (2001).

En el próximo capítulo mostraremos las hipótesis y objetivos de nuestra tesis. En la sección 3 los materiales y métodos utilizados. La configuración del modelo ROMS y una descripción más profunda de los métodos asistido y automático, sus ventajas y limitantes. Además, de presentar los 3 experimentos que realizaremos para ver la estabilidad del modelo, las diferencias de los métodos y la sensibilidad de la formación de filamentos de surgencia. En el capítulo 4 mostraremos los resultados obtenidos para finalmente terminar con una discusión de los objetivos desarrollados.

Capítulo 2

Hipótesis y Objetivos

2.1. Objetivo General

El objetivo general de esta tesis busca estudiar la distribución espacial y temporal de filamentos de surgencia simulados con ROMS en la zona norte de Chile (15 - 35 °S) utilizando como forzante el esfuerzo del viento climatológico de COADS y QuikSCAT, haciendo uso de 2 métodos diferentes: método asistido y automático.

Para cumplir dicho objetivo se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar una interfaz gráfica (GUI) capaz de ayudar a la identificación manual de filamentos y guardar sus características de manera automática.
- Desarrollar una herramienta numérica capaz de identificar y caracterizar filamentos de manera automática a partir de criterios establecidos.
- Identificar ventajas y desventajas de utilizar diferentes métodos de identificación de filamentos.
- Simular filamentos de surgencia utilizando como forzantes climatología COADS y QuikSCAT.
- Estudiar la distribución espacial y temporal de la cantidad, extensión y persistencia de los filamentos de surgencia en cada simulación realizada.

2.2. Hipótesis

Hipótesis 1

Las características de los filamentos serán comparables al utilizar ambos métodos de identificación.

Hipótesis 2

La modificación del forzante de viento en la configuración del modelo afectará las características de los filamentos, espacial y temporalmente: vientos más energéticos producen filamentos más largos y persistentes.

Capítulo 3

Material y Métodos

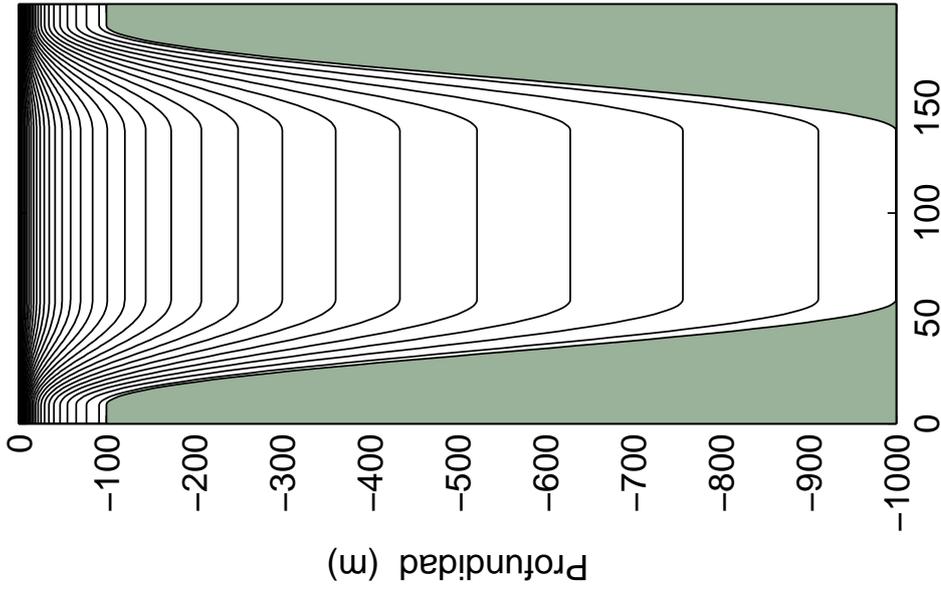
En esta tesis utilizaremos el modelo numérico ROMS y sus herramientas de pre y post procesamiento ROMSTOOLS para simular filamentos de surgencia en la zona norte de Chile (15 - 35 °S). Para su implementación, se necesita MATLAB con sus librerías de NetCDF. ROMS y ROMSTOOLS se pueden obtener de manera gratuita registrándose en la página del IRD (<http://roms.mpl.ird.fr>) y las librerías netCDF desde UNIDATA, corporación miembro de las universidades para investigaciones atmosféricas (UCAR) (<http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf>).

La simulación de filamentos mediante ROMS se dividirá en 3 experimentos (Tabla 3.1). El primer experimento consistirá en utilizar como forzante superficial el esfuerzo del viento climatológico obtenido desde Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (COADS). El tiempo simulado será de 6 años y su fin será la estabilización del modelo. La estabilización consiste en lograr que la energía cinética y los flujos de volumen superficiales tengan una variabilidad determinada, a partir de condiciones iniciales fijas. Para ahorrar espacio de almacenamiento se guardarán las variables mínimas que ofrece el modelo, por ejemplo, una salida de 1.5 gigabytes (Gb) se puede reducir a 80 megabytes (Mb). Estas salidas se ocuparán sólo para ver la estabilidad del modelo y no para el análisis de filamentos.

El segundo y tercer experimento son similares. Ambos toman como condición inicial la última salida del experimento 1 (año 6, mes 12) para inicializar el modelo, el tiempo de simulación es de 4 años y en las salidas son guardadas todas las variables que nos entrega el modelo, pues estas serán utilizadas para estudiar los filamentos en la próxima sección. La diferencia radica en que en el segundo experimento se mantendrá como forzante de las simulaciones COADS, mientras que en el tercero se cambiará por QuikSCAT.

Para facilitar la identificación y caracterización de filamentos provenientes de las salidas del modelo ROMS se desarrollaron e implementaron 2 herramientas computacionales bajo el entorno MATLAB: método asistido y método automático. En este trabajo, compararemos los métodos desarrollados y estudiaremos la sensibilidad de ROMS en la formación de filamentos. La comparación se realizará utilizando 1 año climatológico de salidas del experimento 2 (360 días), correspondiente al año 8 de simulación. Este año no presenta ninguna cualidad especial y fue elegido de forma arbitraria.

b) Grilla Vertical (puntos ρ) Seccion en $\eta = 1$



$\theta = 6$ $\theta = 0$ Tcline = 10 N = 32

a) Grilla Horizontal

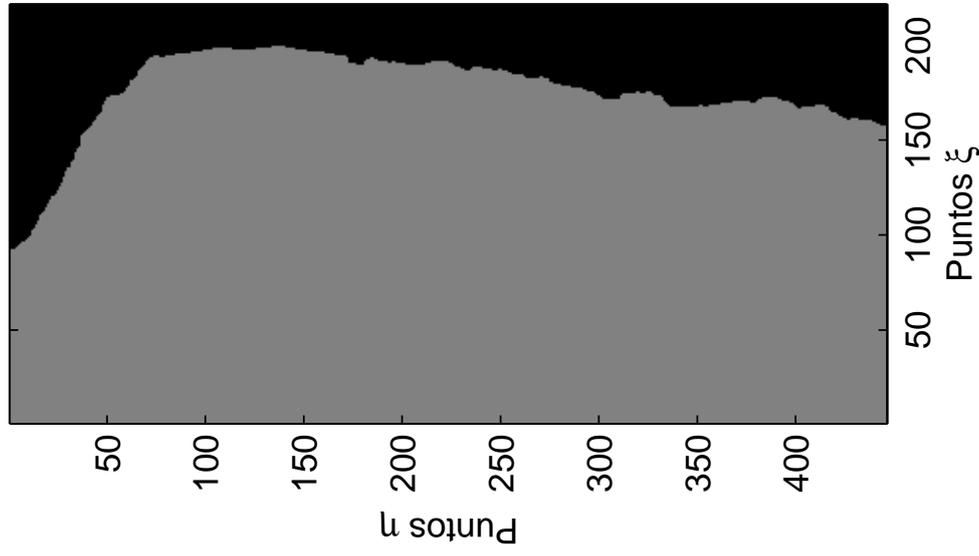


Figura 3.1: a) Grilla horizontal con resolución $1/20^\circ$, corresponde a las coordenadas geográficas $15 - 35^\circ S$ y $69 - 80^\circ W$. b) Distribución de capas sigma en la vertical

El objetivo de la comparación de los métodos es ver la variabilidad en el número de filamentos en su distribución temporal y espacial, al usar distintas formas de identificación, mediante estadística descriptiva.

Tabla 3.1: Esquema de las simulaciones realizadas: la primera columna muestra el experimento, la segunda el forzante del viento, la tercera y cuarta columna, el año inicial y final, respectivamente. La resolución espacial de todos los experimentos es aproximadamente de 50 [km] y se utiliza Large and Pond (1981) para estimar el coeficiente de arrastre (C_D) en el esfuerzo del viento

Simulación	Forzante	Año inicial	Año final
Experimento 1	COADS	1	6
Experimento 2	COADS	6	10
Experimento 3	QuikSCAT	6	10

El estudio de sensibilidad de ROMS en la formación de filamentos se realizará con los resultados del experimento 2 y 3. Debido a la gran cantidad de imágenes (1440 por cada experimento) se utilizará el método automático para la identificación y caracterización de filamentos. Mostraremos como varían sus características, tales como cantidad, extensión y persistencia en el tiempo, de cada año simulado y en promedio mediante el uso de estadística descriptiva.

3.1. Configuración de ROMS_AGRIF

Resolver las ecuaciones primitivas del océano utilizando una alta resolución y una extensa zona de estudio (Tabla 3.2) requiere un gran poder computacional, por los tiempos involucrados en el cálculo (varias horas e incluso días). Por este motivo, se ocupará un computador del Proyecto FONDECYT 11080245 (Tabla 3.3). La ventaja de este computador es que se pueden hacer simulaciones en paralelo mediante la interface 'Message Passing Interface' (MPI). El objetivo del calculo en paralelo es que se pueden realizar varios procesos en distintos CPU's y con ello reducir el tiempo de calculo de las simulaciones (Brieva, 2010).

Tabla 3.2: Resumen con las principales características en la configuración del modelo ROMS

Ancho de la capa esponja [m]	1e5
Latitud máxima	-15.0
Latitud mínima	-35.0
Longitud máxima	-69.0
Longitud mínima	-80.0
Resolución	1/20 °
Capas sigma	32
theta_s	6.0
theta_bs	0.0

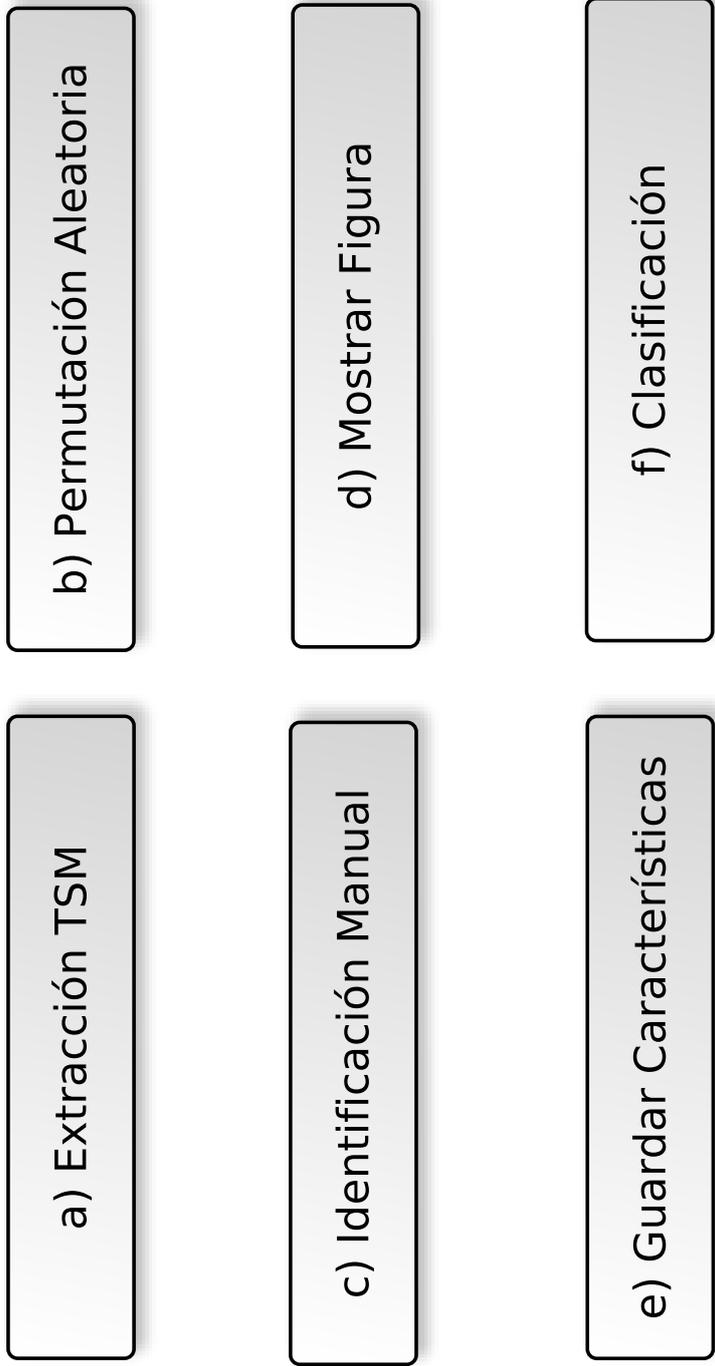


Figura 3.2: Esquema de los pasos lógicos utilizados en el método asistido.

La zona de estudio que abarcarán nuestras simulaciones se encuentran entre los 15 - 35 °S y 69 - 80 °W con una resolución de 5 [km] (Figura 3.1 a). En la vertical se utilizarán 32 capas sigma distribuidas de tal manera que exista una mayor concentración de capas en la superficie. Esto se obtiene al modificar el valor de los coeficientes θ_{s} y θ_{b} , usaremos $\theta_{s} = 6$ y $\theta_{b} = 0$ (Figura 3.1 b). Para el tratamiento de los bordes laterales se utilizará una capa esponja de $1e5$ [m]. Esto funciona de manera que al enfrentarse una señal al borde se comienza a disipar hasta desaparecer por completo, ya que si fuera un borde rígido se produciría ruido debido a la reflexión de la misma señal.

Las condiciones iniciales tanto como la topografía que tendrá el modelo son obtenidas mediante las bases de datos existentes dentro de ROMSTOOLS (Penven et al., 2007). La condición de borde usada es descrita por Marchesiello et al. (2001) y fundamentalmente permite hacer simulaciones largas de forma estable. La topografía será tomada desde la base de datos de ETOPO2 (Smith and Sandwell, 1997), la cuál es una topografía global con una resolución de 2' derivada desde sondeos y observaciones gravitacionales satelitales. Las condiciones iniciales desde World Ocean Atlas 2001 (Conkright et al., 2002), donde las variables de temperatura y salinidad son interpoladas desde los promedios mensuales y los campos de velocidad y nivel del mar comienzan con una condición estacionaria adquiriendo una dinámica con el avance de la simulación. Los forzantes superficiales son tomados desde Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (Da Silva et al., 1994) y datos climatológicos de QuikSCAT (Blanke et al., 2005) con una resolución de 50 km.

Tabla 3.3: Características técnicas del computador utilizado en las simulaciones realizadas con ROMS_AGRIF. Este multi-core pertenece al proyecto FONDECYT 11800245.

Modelo	PowerEdge R710-DELL
Sistema Operativo	Red Hat Enterprise Linux Server Release 5.2 (Tikanga)
CPU	Intel® Xeon® E5520 (2 procesadores) Quad-Core
CPU Speed, Clock Speed	2.26 GHz
Intel QuickPath Interconnect	5.86 GT/s
Bus/Core Ratio	17
L3 Cache	8 Mb
L3 Cache Speed	2.26 GHz
Memoria Física	8 GB (4 módulos de 2 GB DDR3,1066 MB)
Memoria Swap	2 GB
Discos Duros	4 HD SAS 450 GB, 15000 rpm

3.2. Descripción método asistido

El método asistido es un GUI diseñado con el fin de identificar filamentos de manera manual, indicando la base y cabeza de estos con un click en cada punto, pero a su vez que guarde toda la información relativa a éstos en matrices que luego pueden ser procesados (Fig. 3.2). Debido a que el costo computacional de esta rutina es bajo, es decir, que se podría implementar en cualquier computador de oficina y/o computador personal, utilizamos un computador con las características resumidas en la Tabla 3.4.

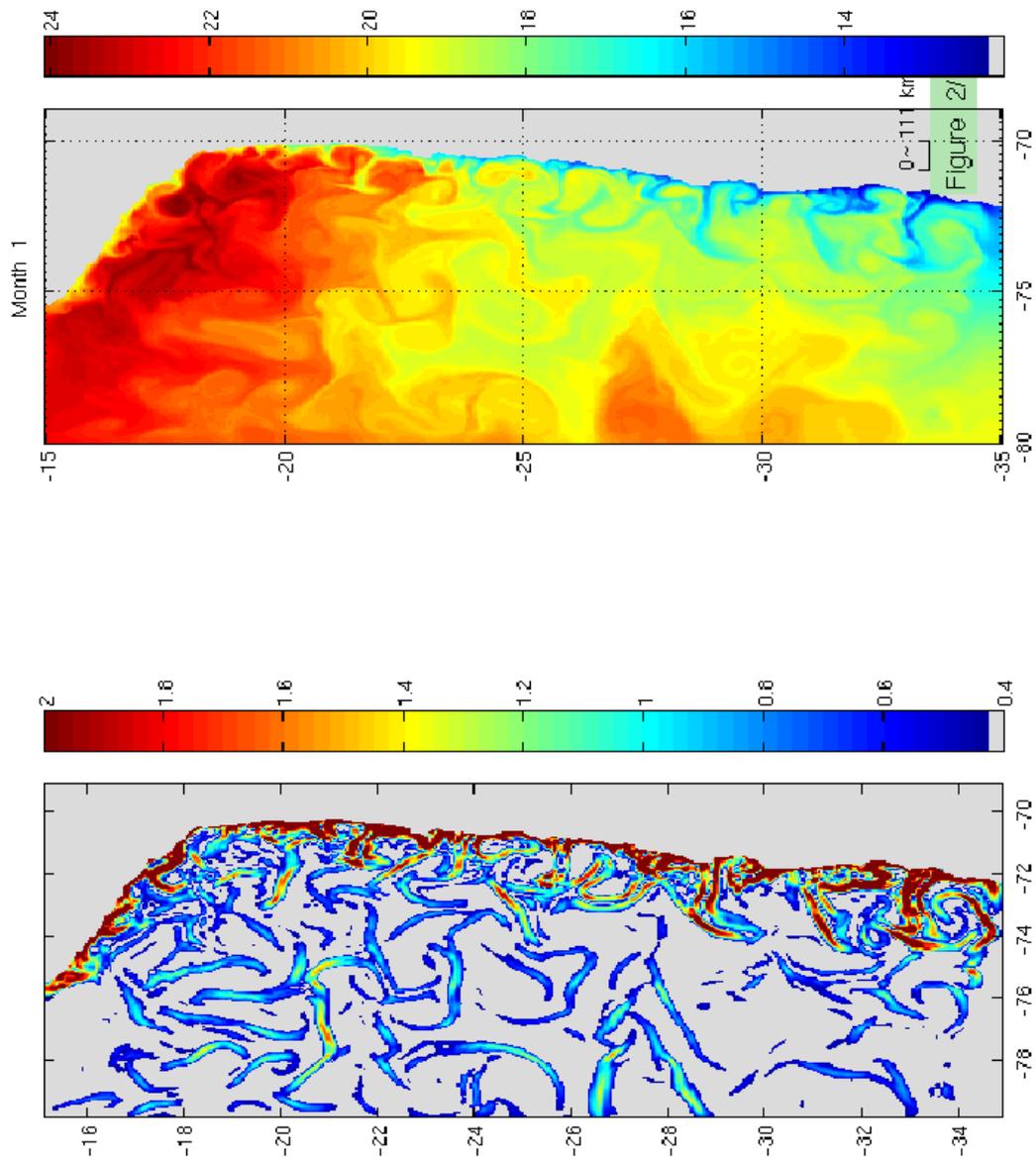


Figura 3.3: Ejemplo de una figura visualizada por el método experto. La gráfica de la izquierda muestra los gradientes horizontales y la de la derecha los contornos de temperatura

Los únicos requerimientos de la máquina que usaremos es que tenga los toolbox de procesamientos de imágenes y lectura de archivos netCDF. Para esto nosotros utilizaremos MATLAB, aunque en teoría podría ser cualquier herramienta numérica de análisis. La rutina extrae la temperatura superficial del mar desde una salida del modelo, generando una matriz con dimensiones de longitud, latitud y tiempo. De esta forma, para una salida del modelo, tenemos 30 imágenes, 1 correspondiente por cada día. Estas imágenes son permutadas de forma aleatoria cada mes para evitar que los filamentos observados por el usuario en una figura previa influyan en la decisión de los filamentos observados en la próxima imagen. Se despliega una figura con 2 gráficas. La de la izquierda muestra una gráfica de gradientes horizontales de temperatura considerando un Δ_x de 30 km y la gráfica de la derecha muestra los contornos de temperatura superficial del mar (Fig. 3.3).

Tabla 3.4: Características técnicas del computador utilizado para la implementación del método experto y automático.

Sistema Operativo	Ubuntu 10.04 Lucid Lynx
Arquitectura	64 bits
CPU	Intel(R) Pentium(R) D CPU 3.20GHz
Discos Duros	300 GB

Extraemos la latitud, longitud inicial y final, en ese mismo orden por cada figura de temperatura superficial del mar. Internamente, por cada filamento dentro de una figura se almacenan: año, mes y día de la simulación, número del filamento y largo. El largo se aproxima utilizando la fórmula de Haversine (Robusto, 1957) que asume una línea recta entre el punto inicial y final considerando la curvatura de la Tierra. Finalmente, se discrimina si los filamentos obtenidos corresponden a filamentos, considerando la Tabla 1.1. Los criterios de nacimiento cercanos a la costa y de gradientes son aplicados por la identificación manual de cada usuario, mientras que la persistencia y largo son aplicados con un análisis posterior.

3.3. Descripción método automático

Se hace necesario contar con una herramienta lo más automática posible para detectar y caracterizar dichos filamentos. En esta tesis implementaremos una técnica de reconocimiento de patrones supervisada utilizando el software numérico MATLAB y los toolbox de procesamiento de imágenes (Gonzalez et al., 2003) y Balu (Mery and Soto, 2008), conocida como visión por computador. El método automático consiste en tomar una imagen digital, resaltar alguna estructura (objeto de estudio) y calcular ciertas características relevantes para un estudio específico (Mery and Soto, 2008). Nuestro objeto de estudio son los filamentos de surgencia y las características a medir son: coordenadas de nacimiento, coordenadas finales y largo. La metodología se aplica sobre las imágenes generadas con los datos originales provenientes de las salidas diarias del modelo ROMS y se resume en 5 pasos (Fig. 3.4)

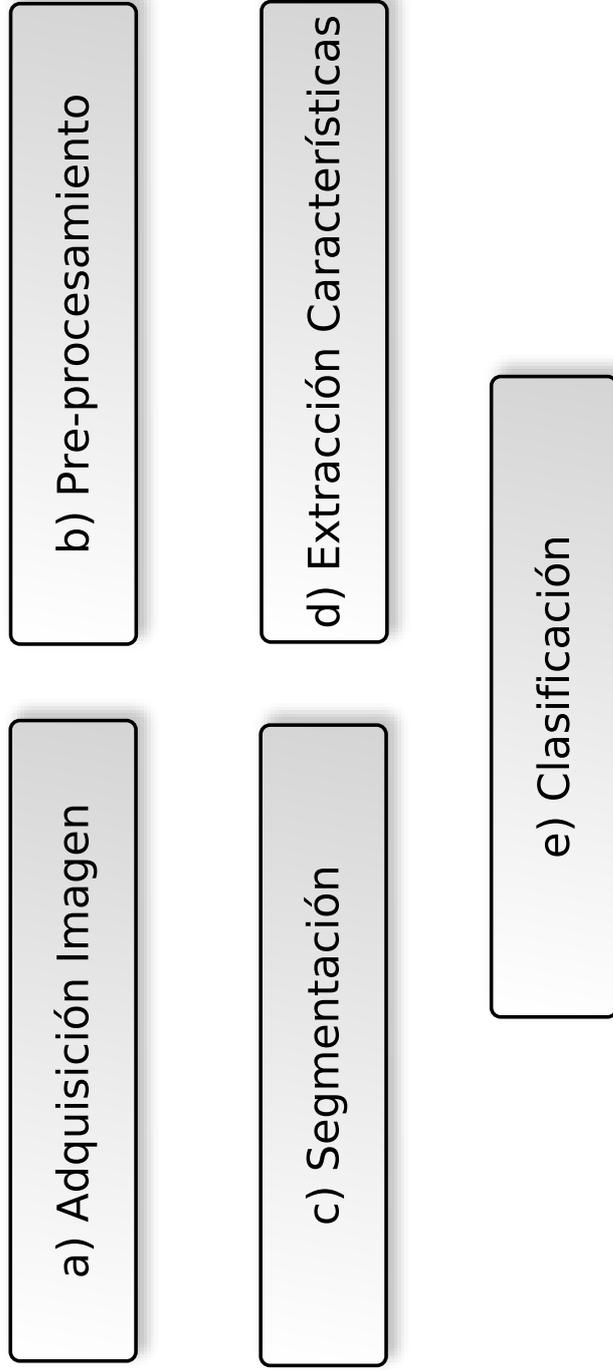


Figura 3.4: Esquema de los pasos lógicos utilizados en el método automático

1. **Adquisición de imágenes:** construcción de una imagen en escala de grises (0-255). Cada valor representa un color específico.
2. **Pre-procesamiento:** mejoramiento de nuestra imagen para resaltar el objeto de estudio. Se utilizan filtros digitales (lineales o no lineales) o se modifican los contrastes o brillos de la imagen.
3. **Segmentación:** separación de las regiones de interés en la imagen. El resultado es una imagen binaria donde un pixel igual a '1' indica pertenencia a la región de interés y '0' indica no pertenencia.
4. **Extracción de características:** medición de las regiones y cuantificación de algunas características.
5. **Clasificación:** los objetos de estudio son asignados a una clase, según los valores de las características medidas.

Las imágenes son adquiridas utilizando datos diarios de temperatura superficial del mar (SST), las coordenadas geográficas, la máscara de la región y el tiempo entregado por el modelo numérico ROMS. La imagen de temperatura I se construye asociando cada valor de temperatura a un valor en escala de gris entre 0 y 255, según la expresión definida en (1). Esta imagen I se post-multiplica con la máscara de la costa para lograr que solo existan valores de la parte oceánica (Figura 3.5).

$$I = \left[\frac{T - \text{mín } T}{\text{máx } T - \text{mín } T} 196 \right] + 60 \quad \text{con } I \in \mathbb{N} \quad (3.1)$$

El operador Sobel (Sobel and Feldman, 1968) es utilizado en el pre-procesamiento. Este es un filtro digital lineal de detección de bordes basado en gradientes que utiliza dos matrices de 3×3 que identificaremos como M_x y M_y .

$$M_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad M_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Al aplicar una convolución entre estas matrices obtenemos las aproximaciones horizontales y verticales de las derivadas de intensidad.

$$I_x = I * M_x \quad I_y = I * M_y \quad (3.3)$$

Obteniendo una imagen filtrada J (Fig. 3.6), que corresponde a la magnitud del gradiente y dado los criterios para definir un filamento, se consideran solo los valores de magnitud de gradientes mayores a $2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

$$J = \sqrt{I_x^2 + I_y^2} \quad (3.4)$$

En la etapa de segmentación utilizamos un detector de bordes llamado Laplacian of Gaussian (LOG). El resultado de esta imagen filtrada (Fig. 3.7), la procesamos mediante una técnica conocida como esqueleto morfológico (véase apéndice C). Esta técnica, usa operadores binarios que permiten describir las características geométricas del objeto (Michielsen et al., 2000).

Una vez hecho el esqueleto morfológico (Fig. 3.8), se extraen las características necesarias para el estudio solo de la zona costera (Fig. 3.9). Para esto, utilizamos una matriz de distancia hacia la costa y consideramos los objetos que se encuentran a una distancia máxima de 10 [km] de ésta. El largo es calculado tomando cada pixel y multiplicandolo por la cantidad correspondiente de la resolución espacial del modelo, en nuestro caso, 1 pixel equivale aproximadamente a 5 km.

La clasificación consiste en discriminar si el objeto de estudio seleccionado y al cual le extrajimos algunas propiedades corresponde a un filamento. Se optó por utilizar un conjunto de criterios definidos previamente y resumidos en la Tabla 1.1 para realizar la clasificación. Todos los criterios, a excepción de la persistencia son aplicados directamente en los pasos previos. Para la persistencia, se identifican las coordenadas de nacimiento de cada filamento y se establece un radio de tolerancia (r_{tol}) para observar por cuanto tiempo estas coordenadas se mantienen dentro de este radio.

Imagen Original



Figura 3.5: Paso 1. Ejemplo de imagen de temperatura superficial del mar en escalas de grises. Tonos más oscuros significan temperaturas más frías.

Imagen Filtrada

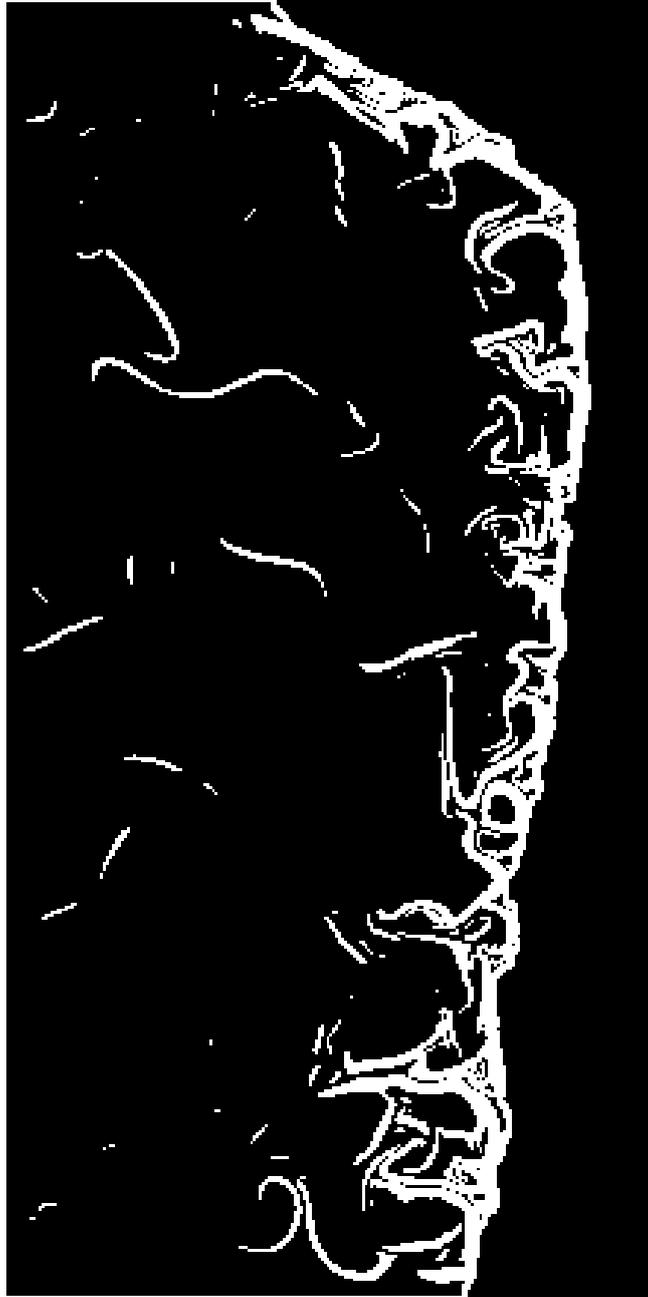


Figura 3.6: Paso 2. Ejemplo de imagen filtrada de temperatura superficial del mar. Los colores blancos indican gradientes horizontales de temperatura mayores a 2 grados.

Imagen Segmentada

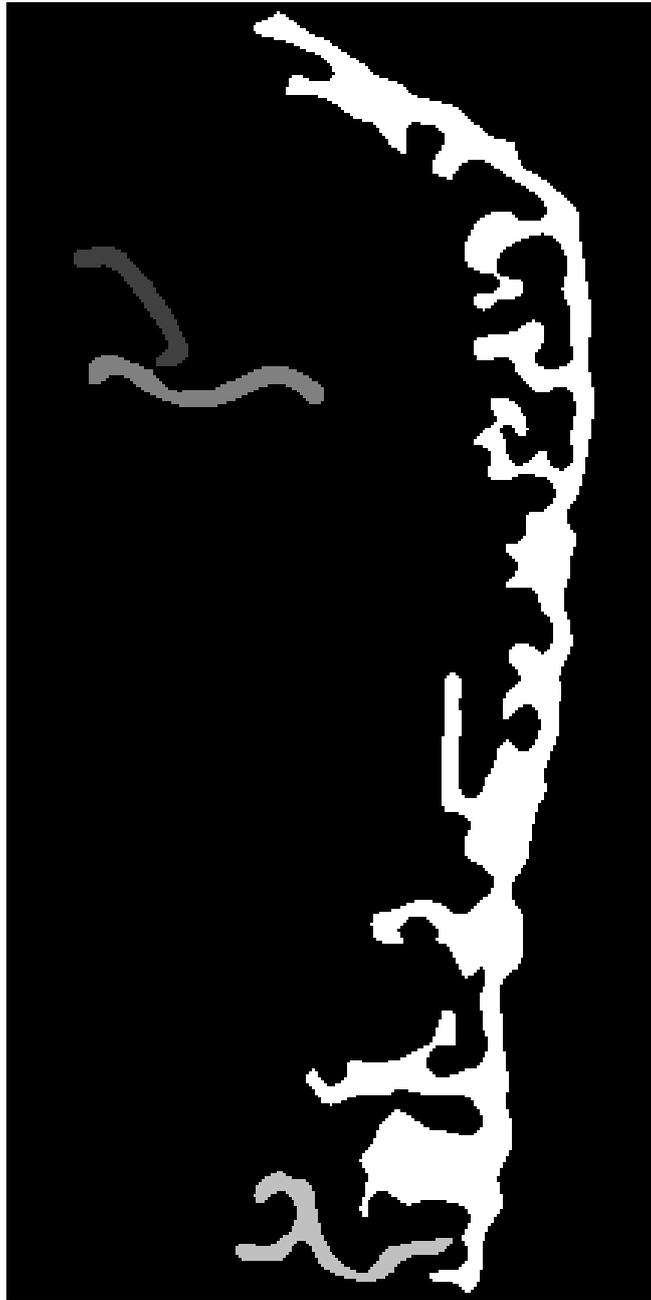


Figura 3.7: Paso 3. Ejemplo de imagen segmentada de temperatura superficial del mar. Cada región es asociada con zonas de diferentes características

Esqueleto Morfológico

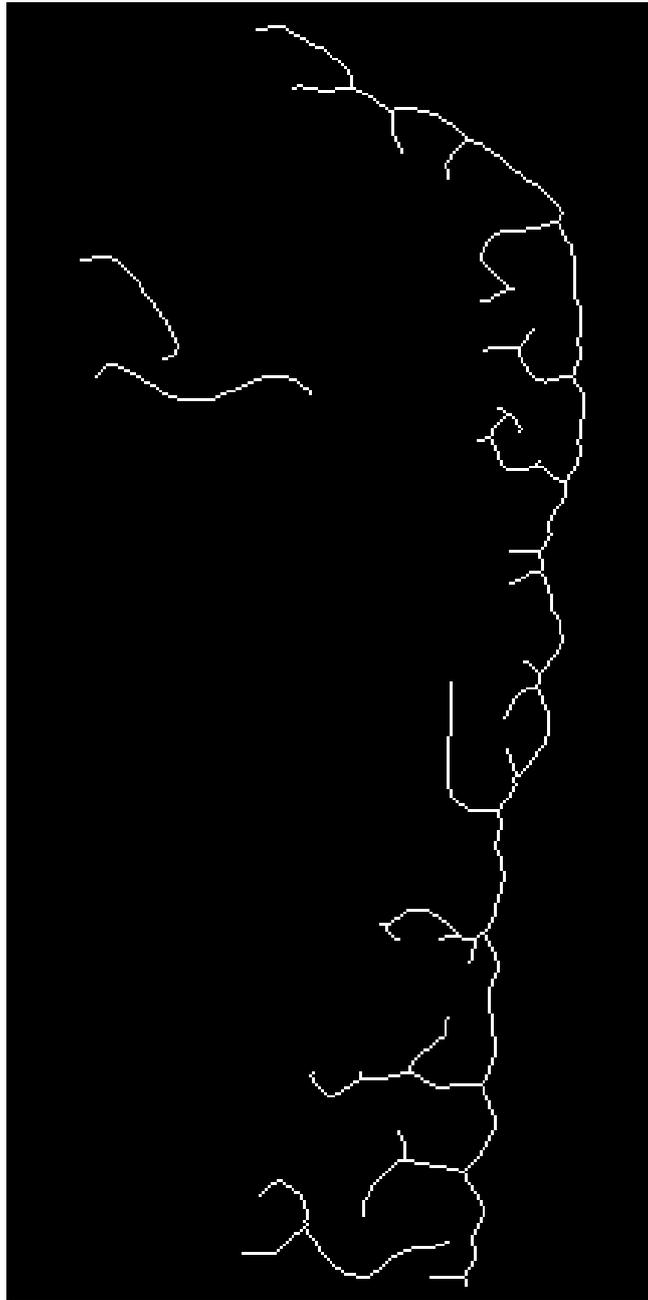


Figura 3.8: Paso 3.1. Ejemplo de un esqueleto morfológico realizado a partir de la imagen segmentada de temperatura superficial del mar.

Extracción de Características

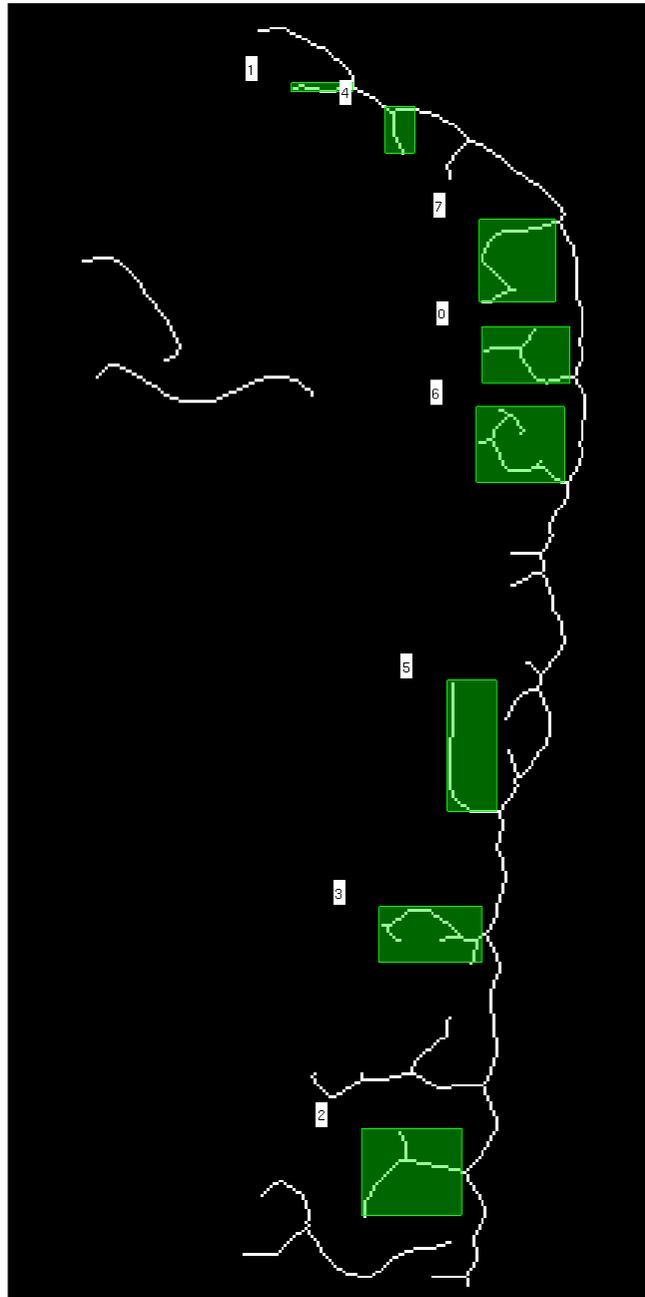


Figura 3.9: Paso 4. Ejemplo de identificación de filamentos costeros a partir de la imagen de esqueleto morfológico.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Descripción simulaciones

Las simulaciones utilizando como forzante COADS o QuikSCAT fueron realizadas en una maquina multi-core (Tabla 3.3). La resolución espacial fue de $1/20^\circ$ y 32 capas sigma en profundidad, resultando en matrices de $220 \times 440 \times 32$ para cada variable simulada, como: temperatura, salinidad, presión, velocidades u y v. Las salidas del modelo son guardadas en archivos netCDF mensuales. Para cada salida mensual se generan 3 archivos, cada cual con diferentes resoluciones temporales: 'history' (his), 'average' (avg) y 'restart' (rst). Los archivos his tienen una resolución temporal diaria, mientras que en los avg y rst son mensuales. La diferencia en estos últimos es que el rst sirve como condición inicial para inicializar el modelo.

Para la simulación se utilizaron 6 cores. Con un paso temporal de 600 [s], el tiempo de simulación para cada salida del modelo fue entre 4 y 8 horas. La variación dependía de los procesos que se estuvieran ejecutando en el servidor. Dependiendo de las variables guardadas el tamaño de los archivos his, avg y rst cambia. Para el experimento 1, tenemos archivos avg de 18.1 MiB, his de 82 MiB y rst de 104.4 MiB. Para el experimento 2 y 3 tenemos, avg de 31.2 MiB, his de 1.5 GiB y rst de 98.4 MiB (Tabla 4.1)

Tabla 4.1: Resumen tamaño archivos de los diferentes experimentos

Simulación	'his'	'avg'	'rst'
Experimento 1	82 MiB	18.1 MiB	104.4 MiB
Experimento 2	1.5 GiB	31.2 MiB	98.4 MiB
Experimento 3	1.5 GiB	31.2 MiB	98.4 MiB

Las condiciones de frontera (OBC) fueron abiertas para la zona 'norte', 'sur' y 'oeste' y cerradas para la zona 'este' de nuestra área de estudio. Las OBC abiertas significan flujos entrantes-salientes de agua y cerradas que no hay flujos. El modelo se estabilizó al segundo año de simulaciones (Fig. 4.1). Tomando la última salida del experimento 1 como condición inicial, se obtuvieron los resultados para los experimentos 2 y 3.

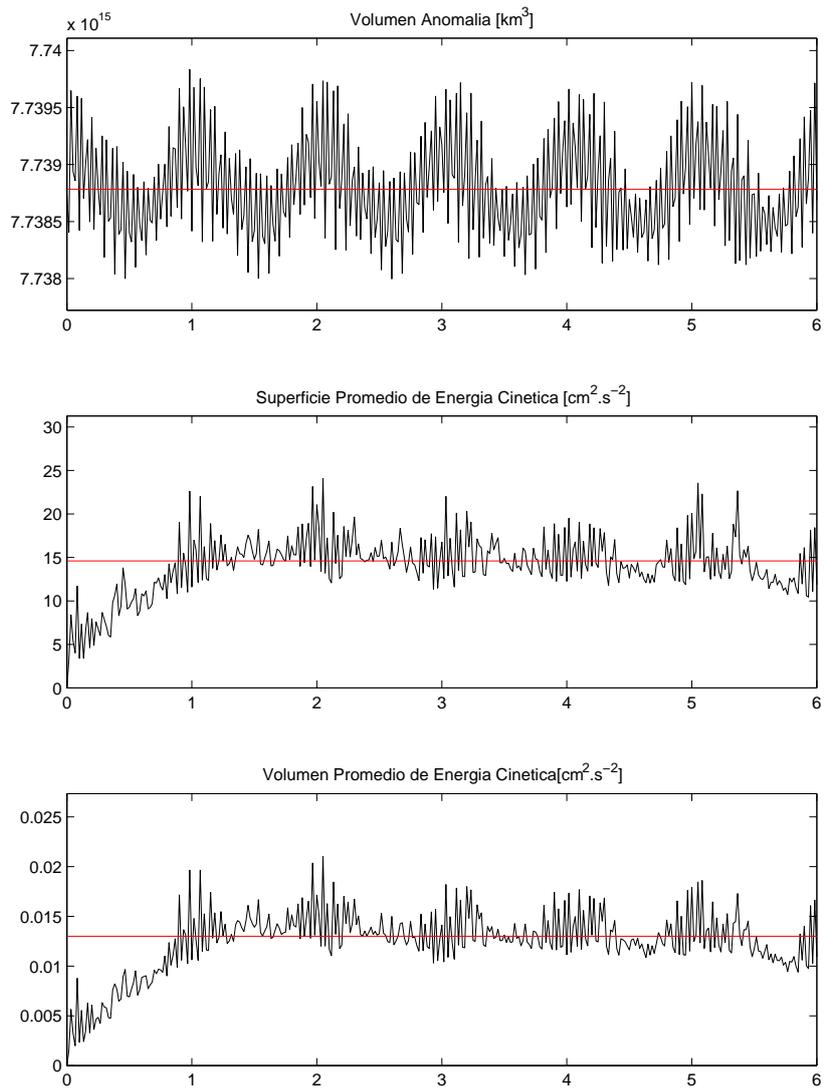


Figura 4.1: Diagnóstico simulaciones forzadas con climatología COADS (experimento 1).
 Apreciamos la estabilidad del modelo al segundo año.

Observamos que el intercambio de aguas en nuestra región de estudio es consistente, pues la anomalía de volumen se mantiene oscilando en torno a los 7.738 y $7.74 \times 10^{15} [km^3]$ (Fig. 4.1 a)). Del mismo modo, reconocemos un ciclo anual, con un valor medio de $7.7388 \times 10^{15} [km^3]$, producto claramente de la naturaleza de la climatología utilizada como forzantes.

La energía cinética, obtenida mediante un promedio de superficies o volúmenes (Fig. 4.1 b) y 4.1c)) muestra que la energía del modelo parte en 0 y crece exponencialmente el primer año, donde comienza a estabilizarse. Ambas figuras muestran un ciclo anual, cuyos máximos energéticos se encuentran asociados a regímenes estacionales de primavera-verano y mínimos a otoño-invierno. Una vez estable, la superficie promedio y volúmen promedio de energía cinética oscilan entre los 12-20 (14.9 en promedio) y 0.01-0.02 [$cm^2 s^{-2}$] (0.09 en promedio), respectivamente.

4.2. Método experto vs automático

El desarrollo de las técnicas para identificación de filamentos, ya sea, de forma semi-automática o automática nos permite estudiar este fenómeno en la escala de tiempo que deseemos. Esto conlleva a poder generar series de tiempo o espaciales de distintas variables, como número, largos o persistencias promedio de filamentos. Para cuantificar como trabaja el método automático se decidió compararlo con identificación manual de filamentos, usando el método asistido. El método asistido fue utilizado por 30 estudiantes de pregrado en geofísica de la Universidad de Concepción. Todos recibieron una capacitación de 20 minutos aproximadamente, en donde se les enseñó a utilizar la herramienta y a identificar los filamentos siguiendo los criterios de la Tabla 1.1.

Para ambos métodos se usó 1 año climatológico de salidas del modelo ROMS (360 días), correspondiente al año 8 de simulación. Este año no presenta ninguna cualidad especial y fue elegido de forma arbitraria, sólo considerando que la dinámica transiente de la zona de estudio se limitaba a los tres primeros años simulados. Los resultados serán referidos a la variación espacial (a lo largo de la costa) y temporal (para distintos meses) del número de filamentos encontrados en el año de estudio.

4.2.1. Costos computacionales y tiempo dedicado

El desarrollo de los métodos asistido y automático fue diseñado utilizando los toolbox de procesamiento de imágenes y Balu. Su implementación fue realizada en un computador con sistema operativo Ubuntu 10.04 Lucid Lynx, de 64 bits de arquitectura, procesador Intel(R) Pentium(R) D CPU 3.20GHz y 8 GB en RAM (Tabla 3.4). Se puede inferir el bajo costo que este implica, tanto económica como operacionalmente. Comparando los métodos podemos destacar las diferencias de tiempo empleados de ambos en contraste a la manera manual. Para analizar 1 año de datos climatológicos, el método automático demora 3 minutos, en promedio el método asistido demoró 3 horas (Fig. 4.3), mientras que de la manera totalmente manual, es decir, identificación y extracción manual, se pueden emplear desde días hasta semanas.

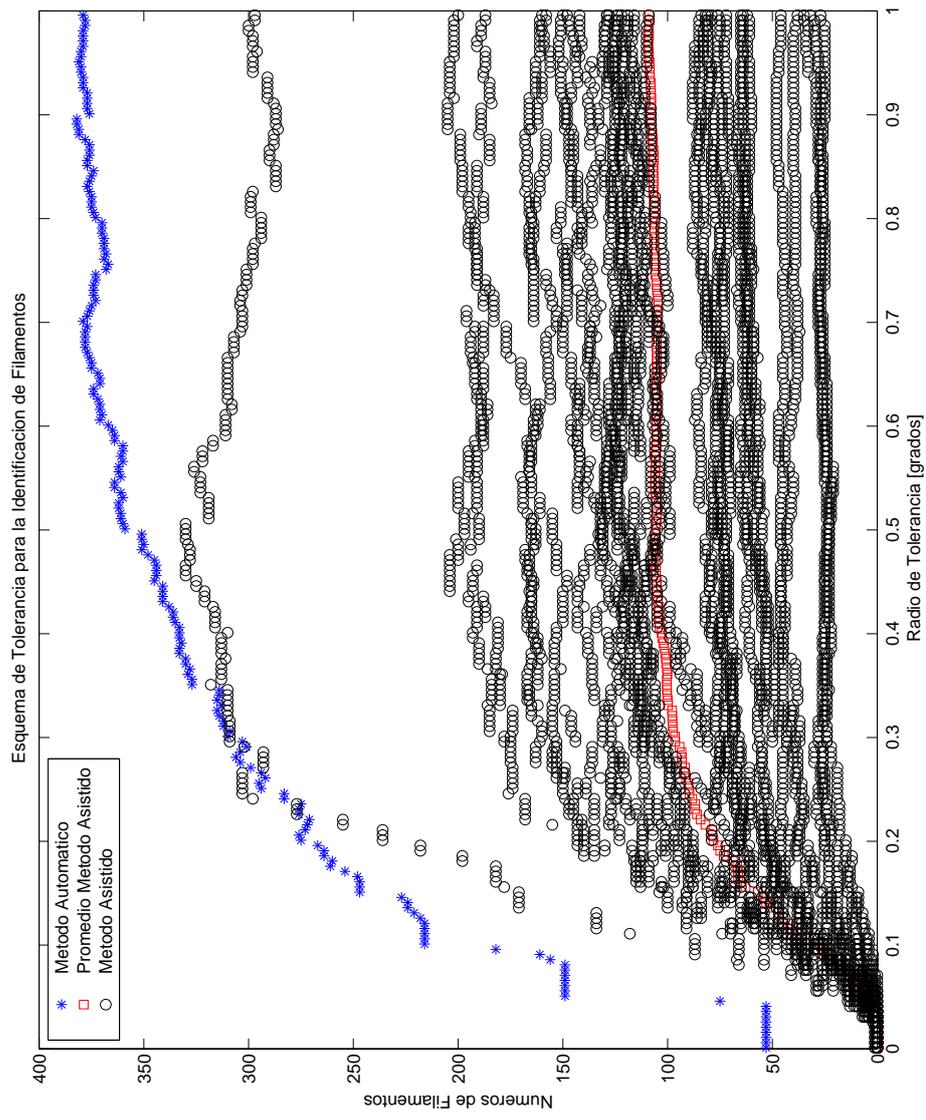


Figura 4.2: Dependencia del radio de tolerancia empleado sobre la cantidad de filamentos de surgencia encontrados en un año de estudio utilizando método asistido y automático. Es posible observar la precisión del método automático en comparación al asistido en determinar el punto de nacimiento del filamento.

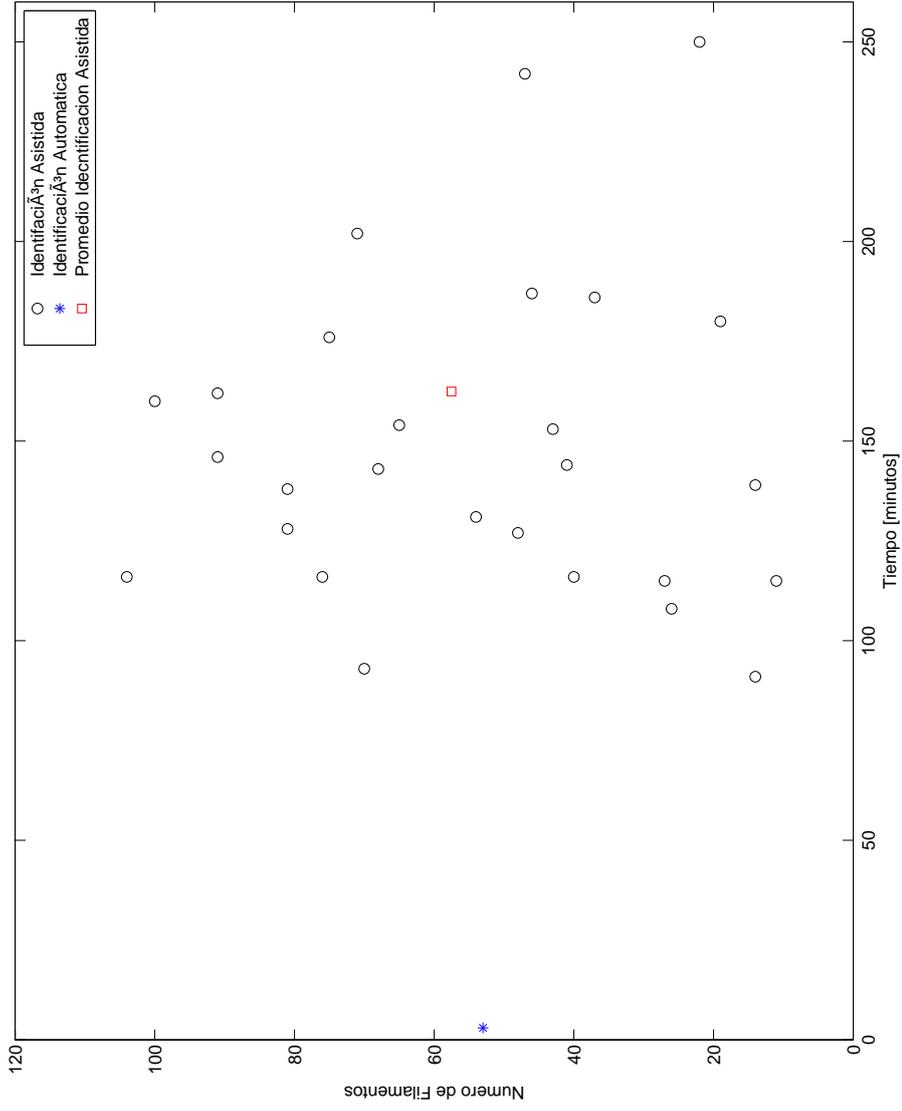


Figura 4.3: Dependencia del tiempo empleado sobre la cantidad de filamentos de surgencia encontrados en un año de estudio utilizando método asistido y automático. Es posible observar la dispersión del método asistido y el ahorro considerable de tiempo al utilizar el método automático.

4.2.2. Identificación del nacimiento de los filamentos

La identificación del nacimiento de los filamentos es un paso importante, pues este criterio es usado para decidir si en dos imágenes sucesivas hay dos filamentos distintos o se trata de un mismo filamento que persiste en el tiempo. Debido a que la rutina de clasificación automática considera para el criterio de persistencia que el punto de origen en la costa del filamento se encuentre en una circunferencia con radio $r = r_{tol}$, es posible inferir la precisión en la determinación del nacimiento de los filamentos de surgencia. Se graficó la cantidad de filamentos encontrados en función de este radio de tolerancia (Fig. 4.2) para ambos métodos de identificación. Recordemos que las salidas del modelo tienen una resolución de $1/20^\circ$ lo que significa que valores menores a $0,05^\circ$ corresponden al pixel exacto. Con esta consideración en mente, podemos observar que el método automático es capaz de identificar filamentos que nacen en el mismo pixel y que los contadores en promedio reproducen estos mismo resultados considerando radios de tolerancia 3 veces mayores. Al considerar $r_{tol} > 0,3$ se observa que la cantidad de filamentos encontrados aumenta en más del doble, a diferencia de lo encontrado por Brieva (2010), del orden de 50 filamentos por año, indicándonos que ambos métodos no pueden utilizar estos valores. De este análisis, consideramos $r_{tol} = 0,04$ para el método automático y $r_{tol} = 0,15$ para el método asistido.

4.2.3. Distribución espacial de los filamentos

Una vez identificados los filamentos, estos fueron agrupados en bins de 1 grado de latitud. La latitud de origen de cada filamento identificado fue redondeada a la latitud entera mas cercana, por ejemplo de -23.4 S a -23 S o de -23.6 S a -24 S. Los valores de $.5$ fueron aproximados a la latitud entero siguiente (-23.5 S a -24 S). Los filamentos encontrados segun la latitud geográfica son mostrados en la (Fig. 4.4). En esta figura, los boxplot corresponden a los contadores, donde los extremos de las cajas corresponden al 75 y 25 % de los datos y la linea roja central a la mediana, mientras que los cuadrados corresponden al valor exacto entregado por el método automático.

Existe una gran variabilidad dentro de los contadores, reflejados en las dimensiones de las cajas del boxplot. Se observa que la cantidad de filamentos encontrados espacialmente por el método automático se encuentran en más de un 80 %. Dentro de los resultados entregados por el método asistido entre los -18 y -33° . Entre los -15 y -17° el método automático identifica más filamentos que el método asistido y entre los -34 y -35° el método automático encuentra menos filamentos que el método asistido. El máximo y mínimos de filamentos encontrados por el método automático corresponden a los -17 y -35° respectivamente con valores de 11 y 0, mientras que el método asistido los encuentra en los -16 y -25° respectivamente, con valores de 7 y 0. La posible explicación de esto, es que la zona norte presenta filamentos más definidos en forma, con un base muy estrecha fácil de reconocer, mientras que en la zona sur la base de los filamentos es más gruesa dificultando la identificación exacta del nacimiento.

4.2.4. Distribución temporal de los filamentos

La cantidad de filamentos encontrados en función del tiempo (Fig. 4.5) obtenidos por el método automático y la mediana de los expertos, muestran un muy buen ajuste entre los meses de enero y abril. Para mayo y junio el automático detecta 3 y 4 filamentos menos. Entre julio y diciembre el método automático detecta más filamentos que el método asistido, llegando por ejemplo en el mes de septiembre a tener diferencias de 7 filamentos. La posible explicación de esto sería el posible cansancio de los estudiantes en la identificación de los meses finales del estudio. Para el método automático se detectan máximos y mínimos de filamentos los meses de septiembre - octubre con 8 filamentos y junio donde no se detectan, respectivamente. Para el método asistido se detectan máximos y mínimos de filamentos los meses de enero con 8 filamentos y agosto con 1 filamento. Se puede apreciar un ciclo anual en método automático.

4.3. Sensibilidad ROMS en la formación de filamentos de surgencia

El modelo para las simulaciones forzadas con COADS y QuikSCAT (experimento 2 y 3) se mantiene estable, al analizar las anomalías de volumen, energía cinética del volumen y superficial promedio (no mostrado aquí). La anomalía de volumen se mantuvo oscilando entre los $7,738$ y $7,74 \times 10^{15} [km^3]$, con un claro ciclo anual. La energía cinética, tanto superficialmente como en volumen, QuikSCAT presenta un valor promedio 1.15 veces mayor que COADS, lo que los hace comparables. La energía cinética promedio en superficie bordea los $300 [cm^2 s^{-2}]$ y en volumen los $30 [cm^2 s^{-2}]$, presentando un claro ciclo anual.

Los valores medios de temperatura y salinidad superficial fueron levemente mayores en COADS que en QuikSCAT, 0.2 y 0.02 para la salinidad y temperatura, respectivamente. Se observan ciclos anuales para la salinidad que bordean los $34.76 PSU$ en promedio. Para la temperatura se observa un ciclo anual que bordea los $17.7 ^\circ C$ en promedio (Fig. 4.6). Para efectos prácticos, estas diferencias son mínimas comparando la alta resolución de nuestra área de estudio y no dejan ver las diferencias reales producto de los forzantes del modelo.

Un análisis de funciones ortogonales empíricas revela las diferencias que existe entre los componentes u y v del esfuerzo del viento (τ_x, τ_y) . En general, podemos apreciar una buena correlación en el tiempo y el espacio, con índices mayores a 0.6 y una mala correlación en el dominio de las frecuencias, cuyo índice no supera los 0.3 (Fig. 4.7 y 4.8). La buena correlación en el espacio y tiempo es bien explicada por los 3 primeros modos ortogonales. Un análisis un poco más en profundidad puede encontrarlo en el apéndice D, debido a que el enfoque de esta tesis es la caracterización de filamentos y no un estudio comparativo de los forzantes de viento.

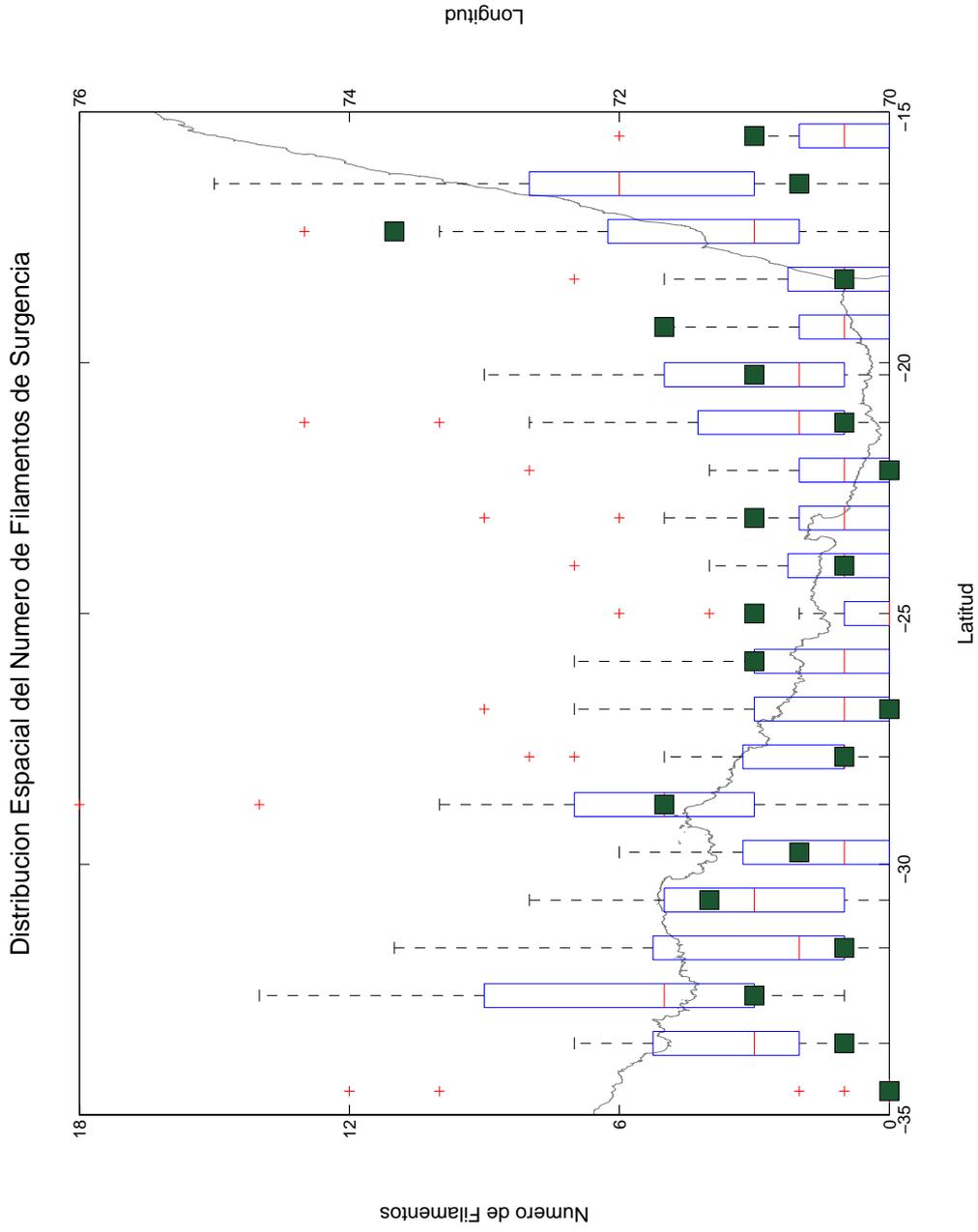


Figura 4.4: Distribución espacial de los filamentos de surgencia. Existe una buena coherencia entre los -18 y -33 i_{rcS} , en la zona más al norte el método automático sobrestima y en la zona más al sur subestima.

Distribución Temporal del número de Filamentos de Surgencia

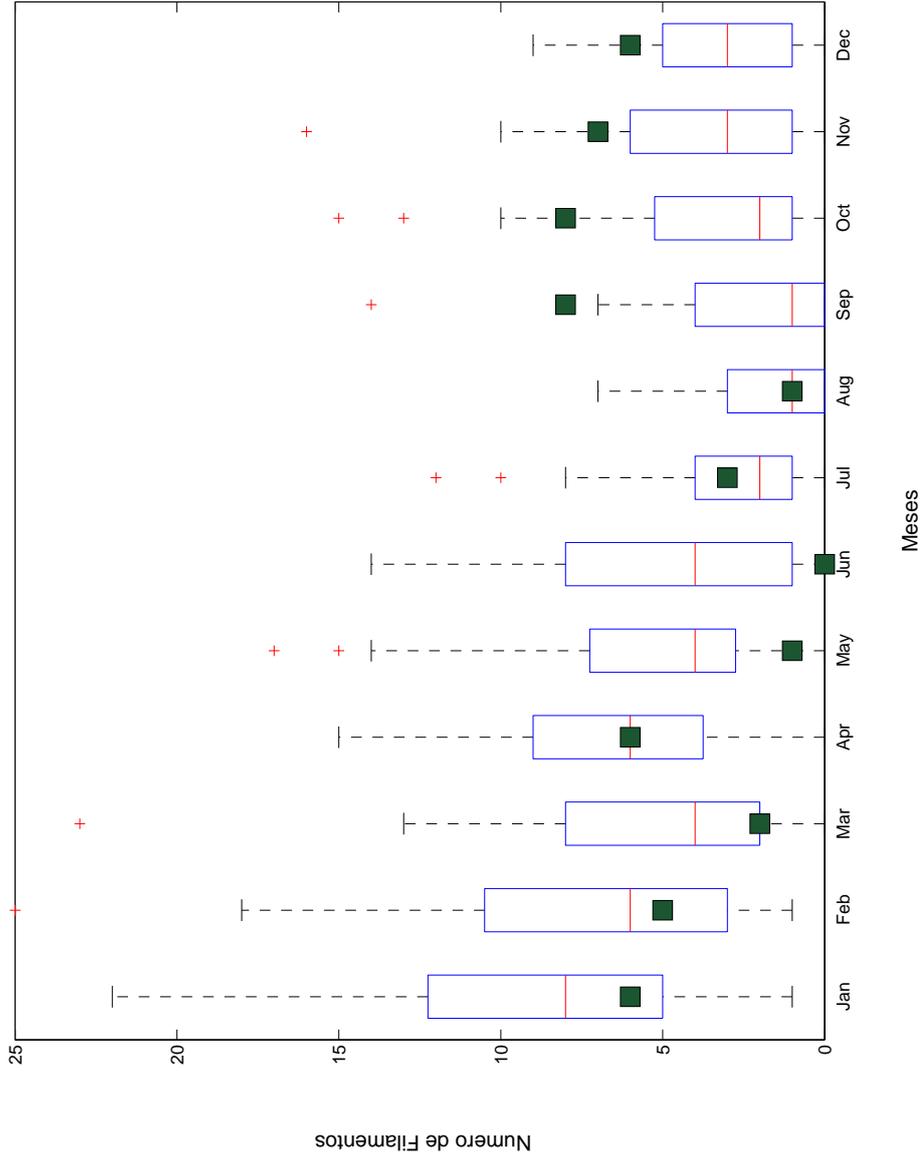


Figura 4.5: Distribución temporal de los filamentos de surgencia. Existe un buen ajuste entre el método automático y la mediana de los identificadores manuales mediante el método asistido los primeros 8 meses. El ajuste de los últimos meses es malo, debido posiblemente al cansancio de las personas que realizaron el conteo.

El estudio de sensibilidad se realizará con las salidas his de los experimentos 2 y 3. Debido a la gran cantidad de imágenes por analizar (1440 cada uno), la identificación y caracterización se realizará mediante el método automático. Los criterios de identificación serán los de la Tabla 1.1, donde ocuparemos un radio de tolerancia de 0.04 para el criterio de persistencia. Los resultados serán referidos a la distribución temporal y espacial de la cantidad, extensión y persistencia en el tiempo de los filamentos para los 4 años simulados individualmente y su suma acumulativa. Su descripción se realizará mediante el uso de una estadística descriptiva básica. En un trabajo futuro, se utilizará estadística no paramétrica para establecer el impacto de utilizar cada forzante de una forma más rigurosa.

4.3.1. Variabilidad cantidad de filamentos

La cantidad de filamentos presenta sutiles diferencias usando como forzantes el esfuerzo del viento de COADS o QuikSCAT. Comparando año a año, hay ocasiones que se encuentran más filamentos con COADS (año 8 y 9) y otros con QuikSCAT (año 7 y 10). El año 7 de simulación (Y7), COADS y QuikSCAT mostraron 47 y 52 filamentos, respectivamente. El año 8 de simulación (Y8), COADS y QuikSCAT mostraron 53 y 48 filamentos. El año 9 de simulación (Y9), COADS y QuikSCAT mostraron 62 y 57 filamentos. El año 10 de simulación (Y10), COADS y QuikSCAT mostraron 45 y 53 filamentos. El Y9 fue el más productivo con 62 filamentos con COADS y 57 con QuikSCAT. La menor cantidad de filamentos con COADS fue el año 10 con 45 filamentos y el año 8 con QuikSCAT con 48 filamentos. La suma acumulativa de estos años resulto en 207 y 210 filamentos utilizando COADS y QuikSCAT, respectivamente (Tabla 4.2). En promedio podemos observar que se encuentran alrededor de 50 filamentos por año simulado.

Tabla 4.2: Resumen sobre la cantidad de filamentos encontrados usando como forzantes COADS o QuikSCAT para cada año simulado. La mayor y menor cantidad de filamentos se encontró en el año 9 y 10 usando COADS con 62 y 45 filamentos, respectivamente. La suma acumulativa de los 4 años encuentra 3 filamentos más usando QuikSCAT

Forzante	Y7	Y8	Y9	Y10	Total [filamentos]
COADS	47	53	62	45	207
QuikSCAT	52	48	57	53	210

Los filamentos encontrados fueron agrupados en bins de 1 grado de latitud, donde se redondeó a la longitud entera más cercana, al igual que la sección anterior. La distribución espacial del número de filamentos mostró una preferencia de formación en la zona norte del área de estudio (15 y 17 °S) en todos los años de simulación (Fig. 4.9). El Y7 muestra 2 'peaks' de formación con COADS en los 16 y 21 °S, al igual que QuikSCAT en los 15 y 16 °S. El Y8 muestra un solo 'peak' para COADS en 17 °S y 3 'peaks' para QuikSCAT en 17, 21 y 33 °S. El Y9 muestra 2 'peaks' para COADS en 16 y 17 °S y solo 1 'peak' para QuikSCAT en 15 °S. El Y10 muestra 2 'peaks' en 15 y 16 °S y 4 'peaks' para QuikSCAT en 16, 17, 20 y 23 °S. Un 47.8 y un 50 % de los filamentos simulados con COADS y QuikSCAT (99 y 105 filamentos), respectivamente, se encuentran entre los 20 y 15 °S. Para los otros bins de latitudes se encontraron en promedio 7 filamentos para ambos forzantes.

Diagnostico Promedio Superficial

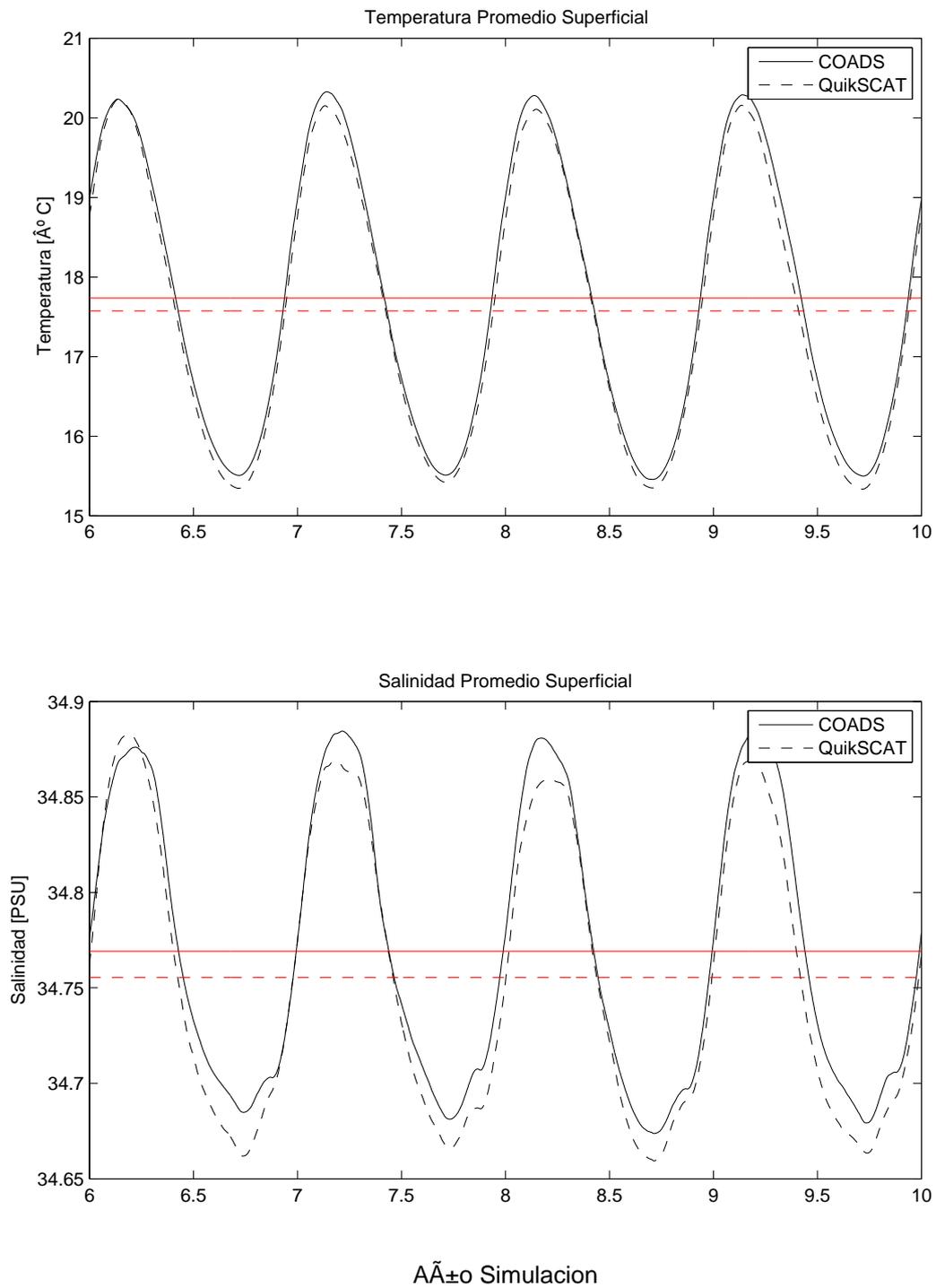


Figura 4.6: Diagnostico promedio superficial de temperatura y salinidad

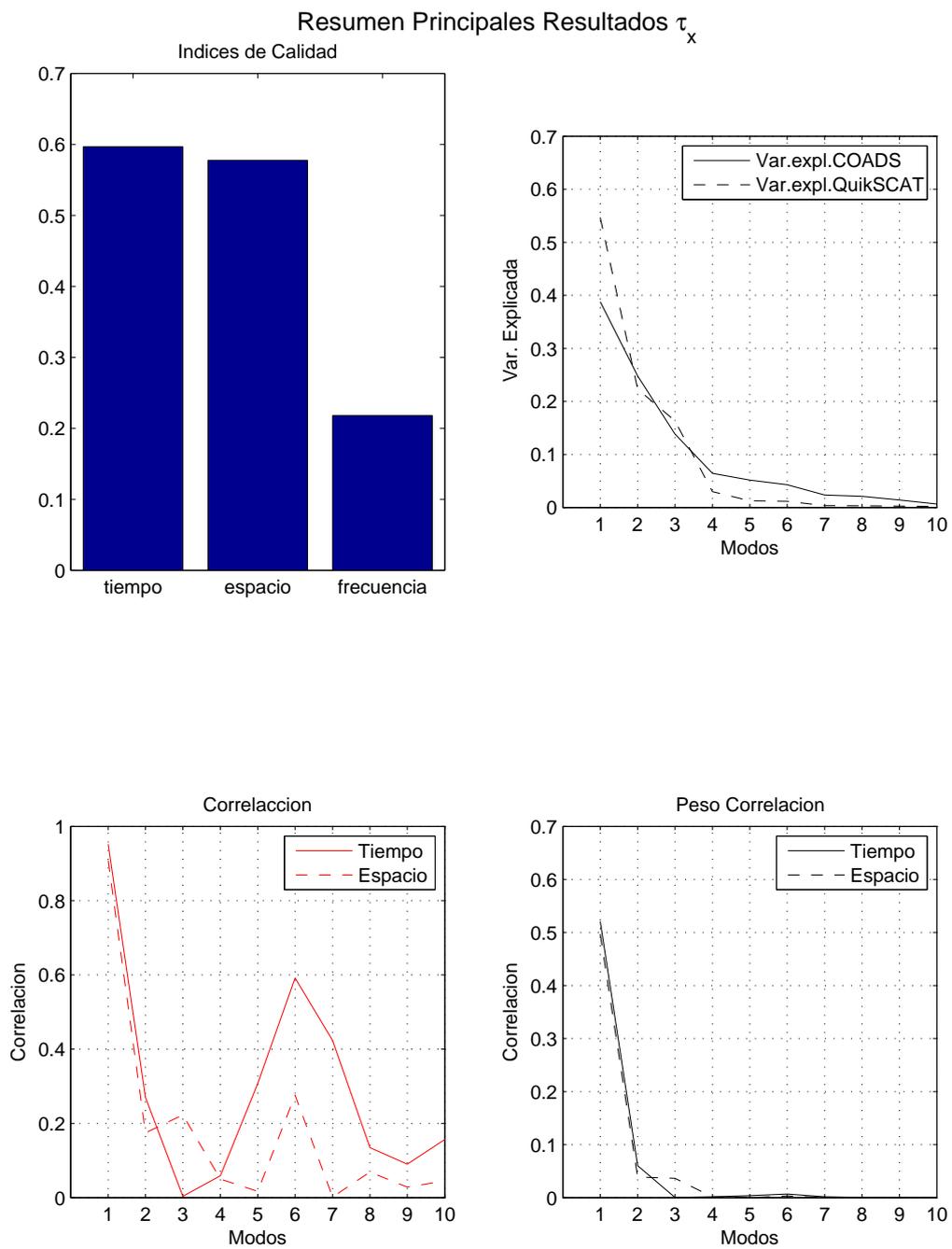


Figura 4.7: Resumen de los principales resultados obtenidos al realizar EOF's entre los τ_x de COADS y QuikSCAT.

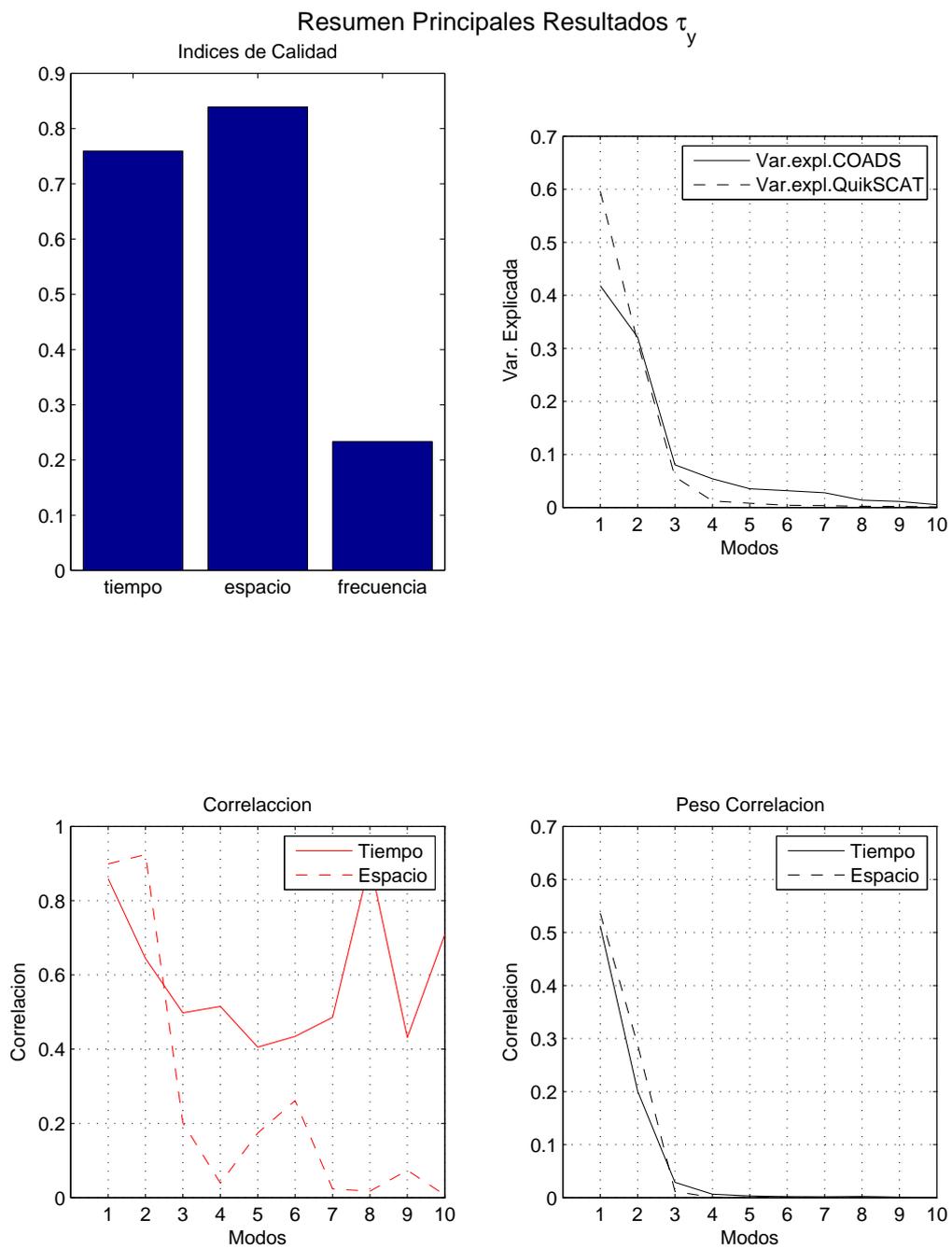


Figura 4.8: Resumen de los principales resultados obtenidos al realizar EOF's entre los τ_y de COADS y QuikSCAT.

La distribución temporal de los filamentos muestra una variabilidad bimodal asociada al forzante COADS y unimodal asociada a QuikSCAT la mayor parte de los años simulados (Fig. 4.10). Con COADS la tendencia de los 4 años indica un aumento en la cantidad de filamentos desde el mes de mayo hasta diciembre para luego decaer hasta abril, mientras que QuikSCAT muestra un aumento desde agosto hasta octubre, luego decae hasta enero y se mantiene constante hasta julio. La época de primavera (octubre-diciembre) fue la más productiva con 91 y 94 filamentos simulados con COADS y QuikSCAT, correspondientes a un 44 % y 44.8 % de los filamentos totales de cada experimento. La época menos productiva fue en otoño (abril-junio) con COADS (13.5 %) y verano (enero-marzo) con QuikSCAT (12.3 %). El Y9 muestra un 'peak' de 19 filamentos para el mes de diciembre con COADS y de 15 filamentos para el mes de octubre con QuikSCAT.

4.3.2. Variabilidad extensión de filamentos

Analizar la extensión de los filamentos tiene sus complicaciones debido a que esta característica está estrechamente relacionada con el número de filamentos encontrados por latitud o por meses. Esta limitante será enfrentada en 3 partes. Primero, usaremos estadística descriptiva (máximos, promedios, mediana) considerando el largo de todos los filamentos. Segundo, consideraremos conjuntos de filamentos por latitud y tercero, consideraremos conjuntos de filamentos por mes.

La mediana de la extensión de todos los filamentos simulados en los 4 años de simulaciones con COADS y QuikSCAT resultan ser iguales (194.25 [km]), aunque son diferentes al considerar los años individualmente. En cambio, la extensión promedio de los 4 años simulados es mayor en QuikSCAT que en COADS, con valores de 209.42 y 200.73 [km], respectivamente. Los filamentos de mayor extensión, organizados por años y forzante son mostrados en la Tabla 4.3. Esto nos muestra un máximo de 349.65 [km] en ambos forzantes que se puede encontrar en distintas latitudes (29, 32 o 33 °S) y distintos meses (11, 12).

Tabla 4.3: Resumen sobre la extensión de filamentos encontrados usando como forzantes COADS o QuikSCAT para cada año simulado.

Tamaño [km]	Año	Forzante	Latitud [°S]	Mes
338.55	Y7	COADS	21	1
349.65	Y8	COADS	29	12
344.10	Y9	COADS	16	3
321.90	Y10	COADS	26	3
349.65	Y7	QuikSCAT	29	11
344.10	Y8	QuikSCAT	21-17	11-12
344.10	Y9	QuikSCAT	16	5
349.65	Y10	QuikSCAT	32-33	12

Distribucion Espacial del Numero de Filamentos

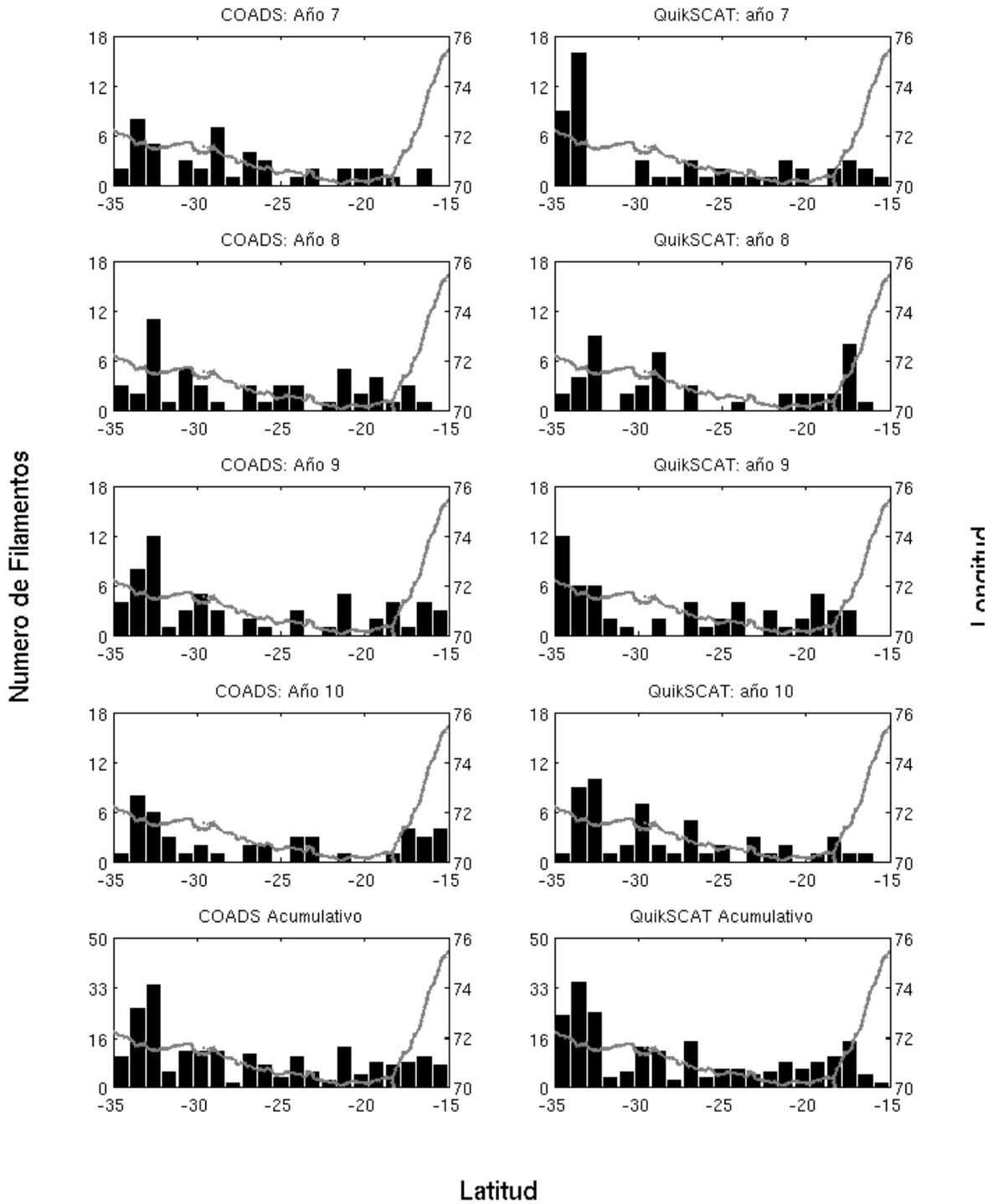


Figura 4.9: Distribución espacial del número de filamentos de surgencia

Distribucion Temporal del Numero de Filamentos

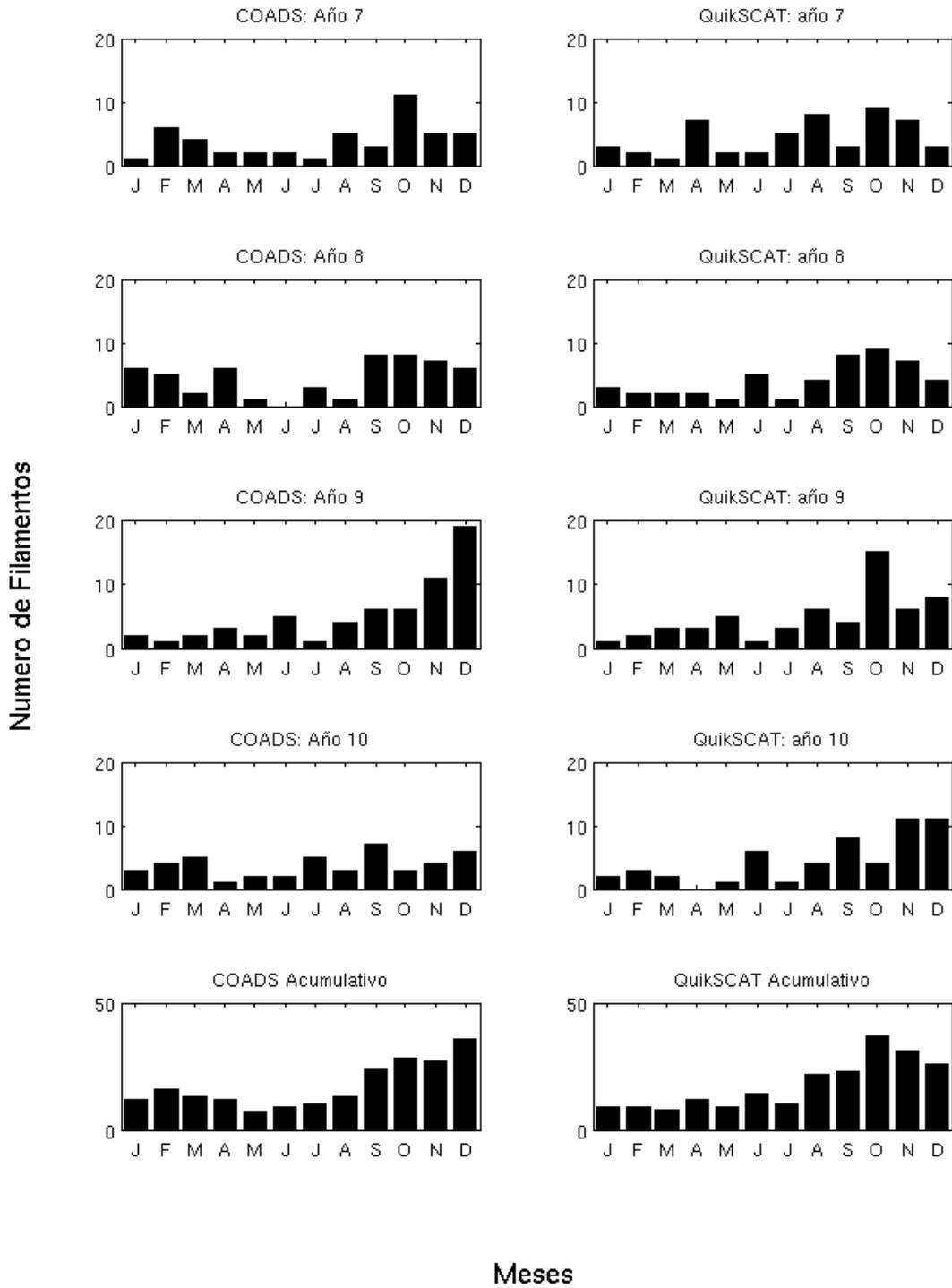


Figura 4.10: Distribución temporal del número de filamentos de surgencia

Tomando cada año de manera individual, obtenemos que la mediana máxima por latitud difiere tanto en ubicación como en su valor al usar distintos forzantes. La ubicación de la mediana máxima con simulaciones forzadas con COADS fue $20^{\circ}S$ para Y7, $18^{\circ}S$ para Y8, $35^{\circ}S$ para Y9 y $24^{\circ}S$ para Y10. Utilizando QuikSCAT la ubicación de la máxima mediana fue $34^{\circ}S$ para Y7, $20^{\circ}S$ para Y8, $28^{\circ}S$ para Y9 y $29^{\circ}S$ para Y10 (Fig 4.11). De manera general, la suma acumulativa de los 4 años simulados, agrupados por latitud, muestra que para COADS la máxima mediana se encuentra en $35^{\circ}S$ con un valor aproximado de 249 [km], mientras que para QuikSCAT, esta se encuentra en $29^{\circ}S$ con un valor aproximado de 288 [km]. Notamos que las medianas alcanzan valores más altos en COADS tanto en la parte norte ($15 - 18^{\circ}S$), como el sur ($35 - 30^{\circ}S$) del área de estudio. En QuikSCAT, los máximos valores de la mediana se encuentran entre los 25 y $35^{\circ}S$.

Al igual que la distribución espacial, la distribución temporal de los largos de filamentos muestran diferencias año a año y con ambos forzantes (Fig. 4.12). Con COADS, las medianas máximas se encuentran los meses de enero, mayo y abril, para los años 7, 8, 9 y 10, respectivamente. Con QuikSCAT, las medianas máximas se encuentran los meses de enero, diciembre y mayo, para los años 7, 8, 9 y 10, respectivamente. Los mínimos con COADS fueron entre junio y julio todos los años, mientras que con QuikSCAT fue más difícil de identificar. En general, para COADS los filamentos más largos fueron en mayo, mientras que en QuikSCAT en marzo y diciembre. Los más cortos fueron en junio con ambos forzantes.

4.3.3. Variabilidad persistencia promedio de filamentos

La persistencia es una característica, que en gran medida no presenta diferencias con COADS o QuikSCAT (Fig. 4.13 y 4.14). Para los 4 años simulados, su promedio fue de 3.47 [días] y su mediana de 3 [días] para ambos forzantes. El filamento más persistente en QuikSCAT se registró con un valor de 11 [días] y correspondió al año 10 de simulación en $16^{\circ}S$ el mes de diciembre. En COADS la persistencia máxima se registró en $19^{\circ}S$ el mes de enero con una duración de 9 [días].

La distribución espacial mostró filamentos del orden de 3 y 5 [días] para la zona entre los 15 y $17^{\circ}S$ para ambos forzantes. La mayor probabilidad de encontrar filamentos más largos en COADS son en 19 y $35^{\circ}S$, mientras que en QuikSCAT se encuentran en $31^{\circ}S$. Temporalmente, los filamentos más largos se encontraron en los meses de septiembre a febrero en COADS y de octubre a diciembre en QuikSCAT. Hay que notar que aunque, en épocas de otoño-invierno existen menos filamentos, estos pueden tener persistencias del orden de 3 a 4 días o mayores. Por ejemplo, el Y9 de COADS presenta un solo filamento en el mes de julio, pero este alcanzó un valor de 8 [días] de persistencia.

Distribucion Espacial de la Longitud Promedio de Filamentos

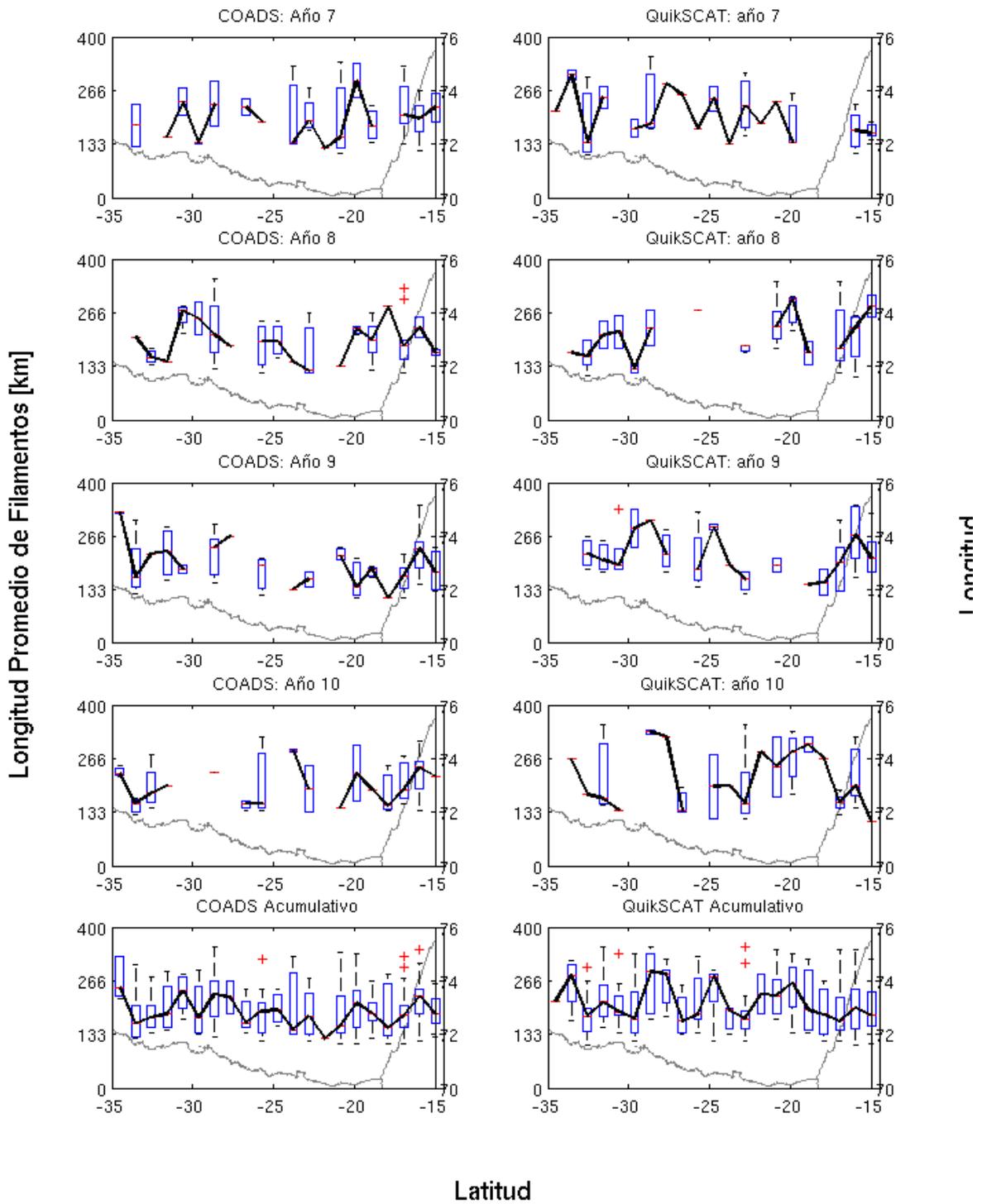


Figura 4.11: Distribución espacial del largo promedio de filamentos de surgencia.

Distribucion Temporal de Longitud Promedio de Filamentos

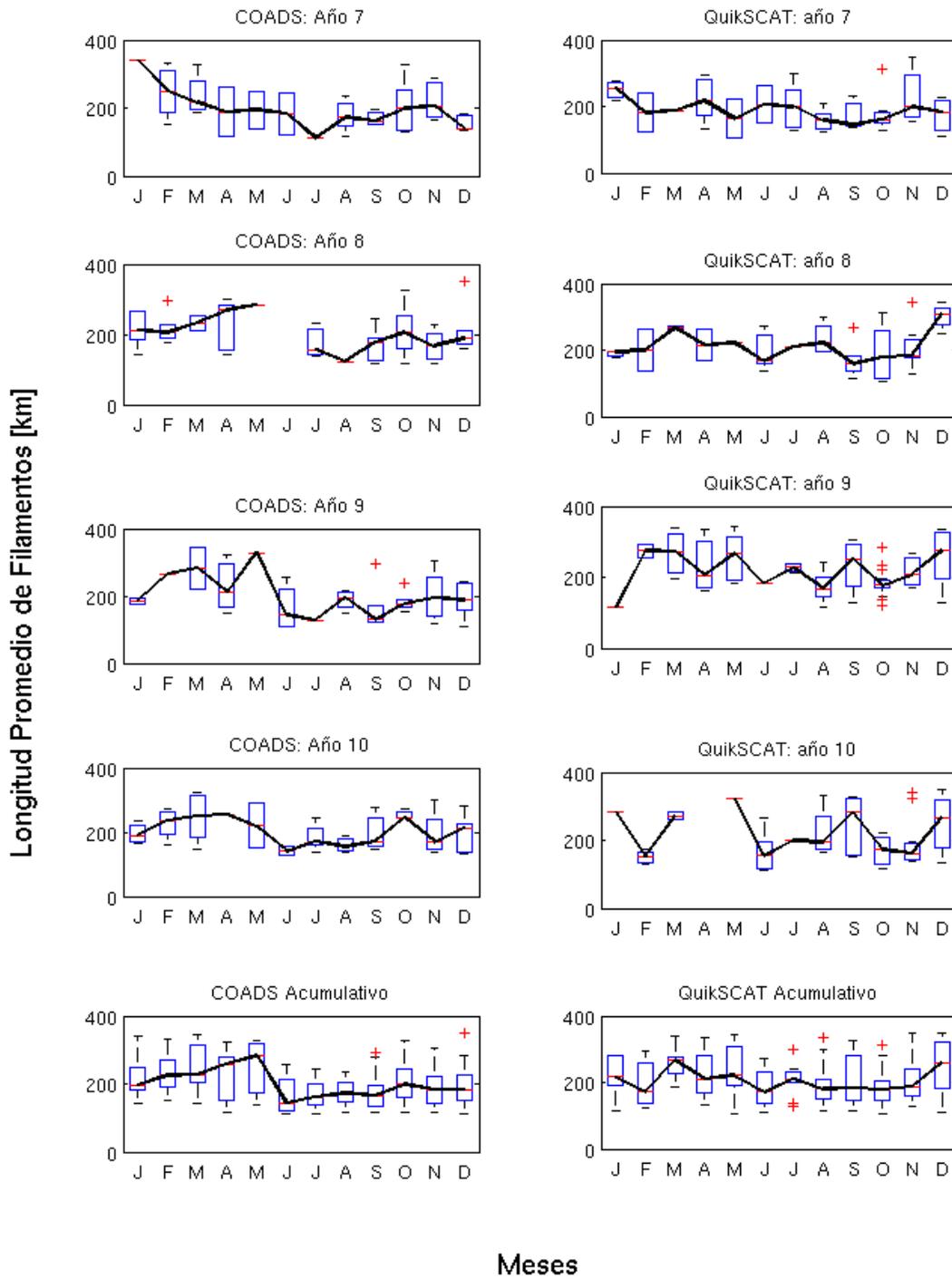


Figura 4.12: Distribución temporal del largo promedio de filamentos de surgencia.

Distribucion Espacial de la Persistencia Promedio de Filamentos

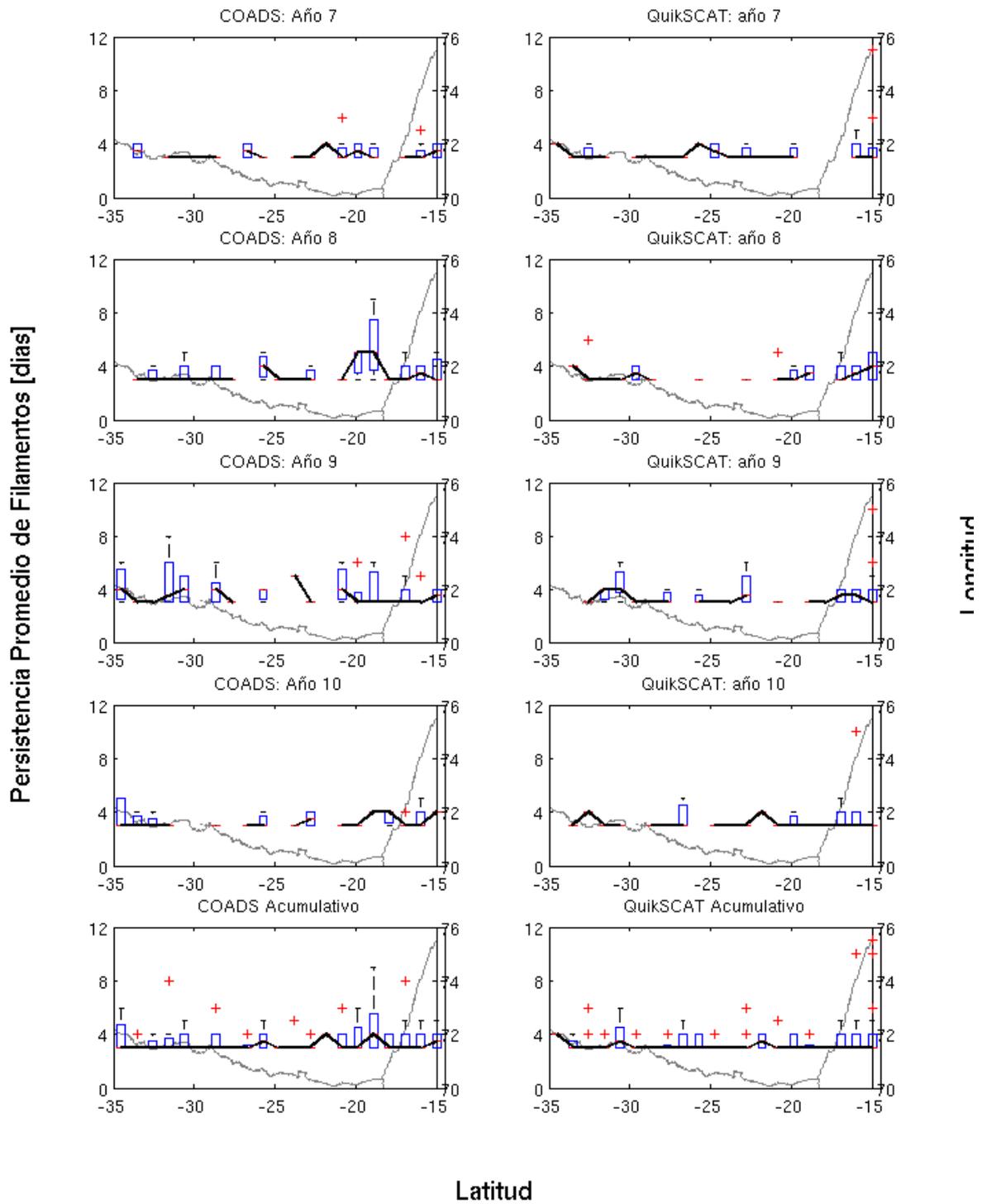


Figura 4.13: Distribución espacial de la persistencia promedio de filamentos de surgencia.

Distribucion Temporal de Persistencia Promedio de Filamentos

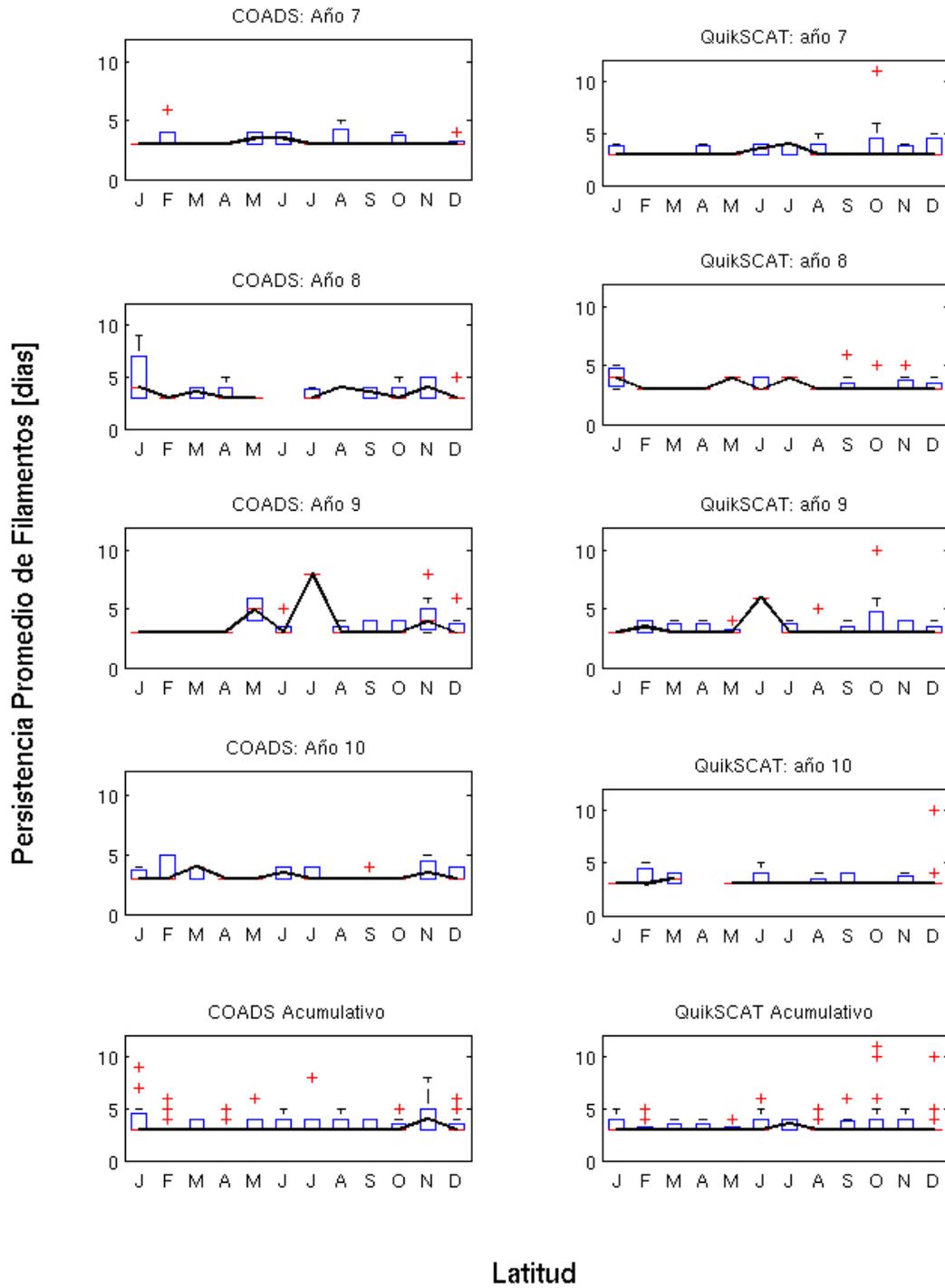


Figura 4.14: Distribución temporal de la persistencia promedio de filamentos de surgencia.

Capítulo 5

Discusión

Esta tesis se ha basado en considerar filamentos de surgencia simulados con ROMS en la zona norte de Chile ($15 - 35^{\circ}S$) utilizando COADS y QuikSCAT como forzante, con el propósito de realizar un estudio detallado de su distribución espacial y temporal. Para ello, el modelo se configuró y ejecutó en modo paralelo en una máquina multi-core de 8 procesadores, dada la alta resolución ($1/20^{\circ}$), el gran tamaño de la grilla empleada (una matriz espacial de $221 \times 440 \times 32$) y la capacidad de almacenamiento de información (192 GiB) que resulta en un gran costo computacional.

Debido a la gran cantidad de información que fue analizada, dentro de los objetivos específicos se encontraba desarrollar 2 herramientas numéricas para identificar y extraer características de filamentos. Cabe recordar, que el único análisis de identificación y caracterización probado y aceptado por la comunidad científica hasta el momento es de manera manual, lo que conlleva a meses de trabajo, que resultan impráctico dado el tiempo destinado para esta tesis (10 meses). Estos objetivos fueron cumplidos de manera satisfactoria, pues se desarrollaron 2 métodos: método asistido y método automático.

El método asistido es un GUI que permitió identificar de manera manual filamentos y guardar sus características de manera automática. Este método opera sobre salidas de temperatura del modelo ROMS, mostrando 2 imágenes: una con los gradientes horizontales de TSM y otro con solamente la TSM. El usuario identifica los filamentos y marca en la imagen de TSM los puntos iniciales y finales de cada uno de estos. La principal ventaja es el control del usuario para determinar si una estructura determinada es en realidad un filamento de surgencia, pues él toma la decisión. Su principal desventaja, en cambio, es que se requiere una gran precisión entre cada imagen correlativa a la hora de establecer el punto inicial de cada filamento, pues si este se encuentra fuera del r_{tol} ($0,15^{\circ}$) es descartado por criterio de persistencia en el tiempo. La Tabla 5.1 muestra un resumen de las principales ventajas y desventajas de este método.

El método automático permitió identificar y extraer las características de filamentos de surgencia de manera automática, rápida y eficiente. Al igual que el método asistido este método opera sobre las salidas de TSM obtenidas de ROMS. La diferencia es que aplicando reconocimiento de patrones, todo el procedimiento de identificación y caracterización lo hace de forma interna. Básicamente, el método toma la TSM, le aplica un filtro, separa estructuras de interés, extrae las características de cada estructura y finalmente

Tabla 5.1: Resumen de las principales ventajas y desventajas del método asistido para la identificación y extracción de características de filamentos de surgencia

Ventajas	Desventajas
<ol style="list-style-type: none"> 1. Bajo costo computacional 2. Fácil de implementar. 3. Control de los puntos de inicio y final de cada filamento. 4. Ahorro considerable de tiempo dedicado (360 imágenes en 3 horas). 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se necesita un usuario experto con conocimientos de filamentos. 2. Las características son guardadas mes a mes. 3. El criterio de persistencia elimina filamentos al presentar menos precisión en el punto inicial entre imágenes correlativas. 4. El largo es aproximado como una línea recta entre el punto inicial y final del filamento.

decide si la estructura es un filamento. La principal ventaja es el uso que se le puede dar a esta herramienta, pues permite analizar una gran cantidad de información en poco tiempo (1 año en 3 minutos). En cambio, como desventaja se tiene que el método aún no se ha validado. Un resumen de estas ventajas y desventajas son mostradas en la Tabla 5.2

Tabla 5.2: Resumen de las principales ventajas y desventajas del método automático para la identificación y extracción de características de filamentos de surgencia

Ventajas	Desventajas
<ol style="list-style-type: none"> 1. Bajo costo computacional 2. Fácil de implementar. 3. No se necesita un usuario experto con conocimientos de filamentos para utilizar el método. 4. Ahorro considerable de tiempo dedicado (360 imágenes en 3 minutos). Lo cual permite analizar series largas de tiempo 5. Mejor precisión en determinar la persistencia de un filamento cuando los filamentos son bien definidos. 6. El largo se aproxima tomando pixel a pixel, teniendo un valor más realista. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Método aún no validado 2. Las características son guardadas una vez terminado de ejecutarse el análisis. 3. No se tiene control de los puntos de inicio y final de cada filamento. 4. Elimina filamentos con bases muy angostas, pues el punto inicial varía demasiado, excediendo el r_{tol}

En resumen, mostramos una adaptación de las técnicas de reconocimiento de patrones a la oceanografía física. En esta oportunidad, la desarrollamos para identificar filamentos de surgencia a partir de salidas del modelo numérico ROMS, aunque perfectamente se puede modificar para salidas de cruceros oceanográficos, boyas o información satelital y a otras estructuras como remolinos de meso-escala, jet costeros o frentes cambiando

los criterios de identificación. El tiempo de procesamiento es extramadamente rápido comparado con la manera manual, del orden de 3 minutos para un año de resultados numéricos y de bajo costo computacional. Este punto es importante pues, dado lo difícil que es obtener observaciones directas de los filamentos de surgencia, una adecuada representación de su estructura espacial y variabilidad temporal a través de modelos numéricos permitiría entender mejor su rol en las interacciones físico-biológicas en el medio marino costero.

Aunque COADS o QuikSCAT presenten la misma resolución espacial ($1/2^\circ$) y temporal (climatología mensual), su uso como forzante de un modelo numérico oceánico muestra diferencias en la variabilidad temporal y espacial de la cantidad, largo y persistencia de filamentos de surgencia. Utilizando el método automático, con un radio de tolerancia de $0.04 [^\circ]$ se encontró que ambos forzantes producen alrededor de 50 filamentos por año. Aproximadamente el 50 % de los filamentos encontrados en los 4 años de simulaciones con ambos forzantes nacen entre los 15 y $20^\circ S$, siendo las épocas de primavera - verano las más productivas. Cabe notar que dependiendo del forzante se pueden generar filamentos en cualquier época del año.

A través del estudio de energía cinética del modelo, se encontró que al usar QuikSCAT el modelo presenta una energía cinética promedio levemente mayor. Esto puede explicar la mayor cantidad de filamentos y largos mayores encontrados con QuikSCAT. Los largos mayores para ambos métodos se encontraron al sur del área de estudio ($28 - 35^\circ S$) en los meses de mayo con COADS y marzo con QuikSCAT. Esto a su vez, puede significar que mayor cantidad de filamentos produzca filamentos mas cortos y menos persistentes. La mediana de la persistencia de los filamentos simulados muestra un valor de 3 días en gran parte de la simulación, lo que se contradice con estudios como el de Grob et al. (2003), en el cual se mencionan persistencias de 10 a 60 días. La explicación más sencilla de esto, puede estar en los criterios de definición para un filamento, pues deben cumplirse todos en forma simultánea y al fallar uno sólo, el método de identificación lo descarta inmediatamente.

Finalmente, podemos decir con respecto a las hipótesis propuestas, que estas se cumplen de la siguiente manera. La hipótesis 1 es aceptada, pues encontramos que si bien existen diferencias entre los resultados de ambos métodos, al utilizar estadística descriptiva básica no son significativas, ya que lo que se refiere a cantidad de filamentos, ambas producen de manera similar su distribución espacial y temporal. Esto nos da un buen pie para utilizar estadística más dura para cuantificar y validar dichos resultados.

La hipótesis 2 también es aceptada, por los resultados aquí mostrados, además de estudios preliminares (Brieva, 2010, Brieva et al., 2010, Batteen et al., 1992), que muestran que la representación de los filamentos de surgencia es altamente sensible a las parametrizaciones del modelo usado. Sin embargo un análisis extensivo de estas parametrizaciones puede involucrar decenas de escenarios, con centenas o miles (uno a varios años) de imágenes como resultado y el análisis de tal numero de simulaciones es poco práctico para un observador experto. Es entonces que una adecuada validación de los resultados obtenidos por el método automático aquí presentado permitirá justificar su uso como herramienta de comparación entre distintas simulaciones y actuar así tam-

bién como herramienta identificadora de la simulación más realista, en el sentido de su comparación con observaciones remotas (satélites) o directas mediante cruceros de investigación.

En un futuro se pretende analizar 20 años de simulaciones, cada una utilizando un forzante de viento de diferente procedencia, resolución espacial y temporal. Validar la herramienta automática y realizar una estadística más rigurosa para establecer que tan significativos son las diferencias encontradas con cada forzante utilizando el método automático.

Apéndice A

ROMS_AGRIF

ROMS (Regional Ocean Model System) (Shchepetkin and McWilliams, 2005) es un modelo de circulación oceánica tridimensional dependiente del tiempo que resuelve las ecuaciones primitivas sobre una grilla Arakawa-C (Fig. A.1). En la horizontal se utilizan coordenadas curvilíneas (que permiten un mejor ajuste en las regiones costeras). Es una aproximación de diferencias finitas centradas de segundo orden (Arakawa and Lamb, 1981) En la vertical también se utiliza una aproximación de diferencias finitas de segundo orden (Fig. A.2), conocidas como coordenadas sigma (Song and Haidvogel, 1994), las cuales siguen el trazado de la batimetría.

Emplea uno de cuatro diferentes submodelos de clausura turbulenta para resolver la mezcla vertical en las capas superficiales y de fondo: LMD (Large et al., 1994), MY25 (Mellor and Yamada, 1982), GLS (Umlauf and Burchard, 2003) y BVF (Gargett and Holloway, 1984). La mezcla horizontal se resuelve con un operador Laplaciano y un coeficiente de difusión que depende de los gradientes del flujo medio. Las ecuaciones gobernantes son resueltas junto con las condiciones de borde mediante métodos de diferencias finitas. Para lograr mayor eficiencia computacional en casos donde la propagación de ondas superficiales sea importante, el modelo emplea una separación en dos modos para resolver las ecuaciones primitivas hidroestáticas para momentum, uno externo con paso de tiempo más pequeño para procesos barotrópicos y otro interno con paso de tiempo menos restrictivo para procesos baroclínicos (Marchesiello et al., 2001).

A.1. Ecuaciones de movimiento

Las ecuaciones primitivas en coordenadas cartesianas, expresadas como el balance de momento en las direcciones x e y , respectivamente son:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla u - fv = -\frac{\partial \phi}{\partial x} + F_u + D_u \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla v - fu = -\frac{\partial \phi}{\partial y} + F_v + D_v \quad (\text{A.2})$$

donde u, v son las componentes de las corrientes zonal y meridional, respectivamente. t es el tiempo, f es el parámetro de Coriolis, $\phi = (P/\rho_0)$ es la presión dinámica, F son

los términos difusivos y D los términos advectivos. Las ecuaciones difusivas-advectivas:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T = F_T + D_T \quad (\text{A.3})$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla S = F_S + D_S \quad (\text{A.4})$$

donde T es la temperatura potencial y S es la salinidad. La ecuación de estado:

$$\rho = \rho(T, S, P) \quad (\text{A.5})$$

donde P es la presión y ρ es la densidad del océano. La ecuación de momento vertical:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = -\frac{\rho g}{\rho_0} \quad (\text{A.6})$$

donde z es la coordenada vertical, g es la aceleración de gravedad y ρ_0 es una densidad de referencia. La ecuación de continuidad para un fluido incompresible

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{A.7})$$

Las ecuaciones de advección-difusión gobiernan la evolución temporal de los campos de temperatura potencial y salinidad. En la aproximación de Boussinesq, las variaciones de densidad son descartadas en las ecuaciones de movimiento, salvo en su contribución a la fuerza de boyantez en la ecuación de momento vertical. Bajo la aproximación hidrostática, se supone, que el gradiente vertical de presión equilibra la fuerza de boyantez. Para el momento, los efectos de forzamiento y disipación estarán representadas por los términos esquemáticos F y D , respectivamente.

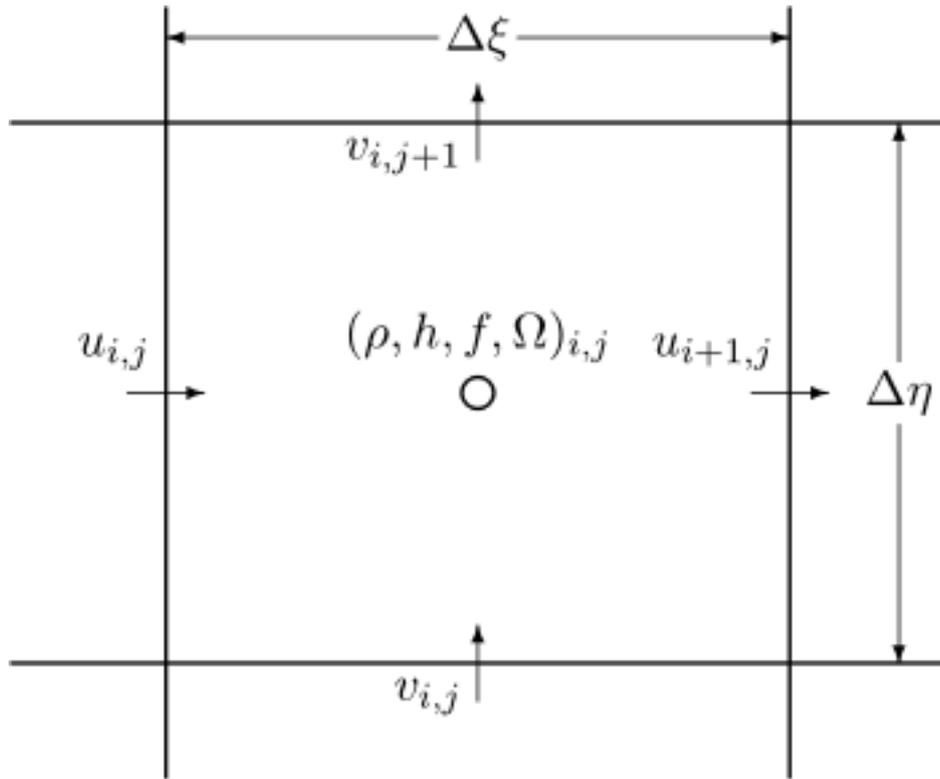


Figura A.1: Ubicación de variables sobre una grilla Arakawa-C. La componente zonal de la corriente u se encuentra en la mitad en el centro de los bordes laterales, mientras que la componente meridional se encuentra en el centro de los bordes horizontales. El resto de las variables se encuentran en el centro de la grilla. Figura tomada de la pagina de ROMS (<http://roms.mpl.ird.fr>)

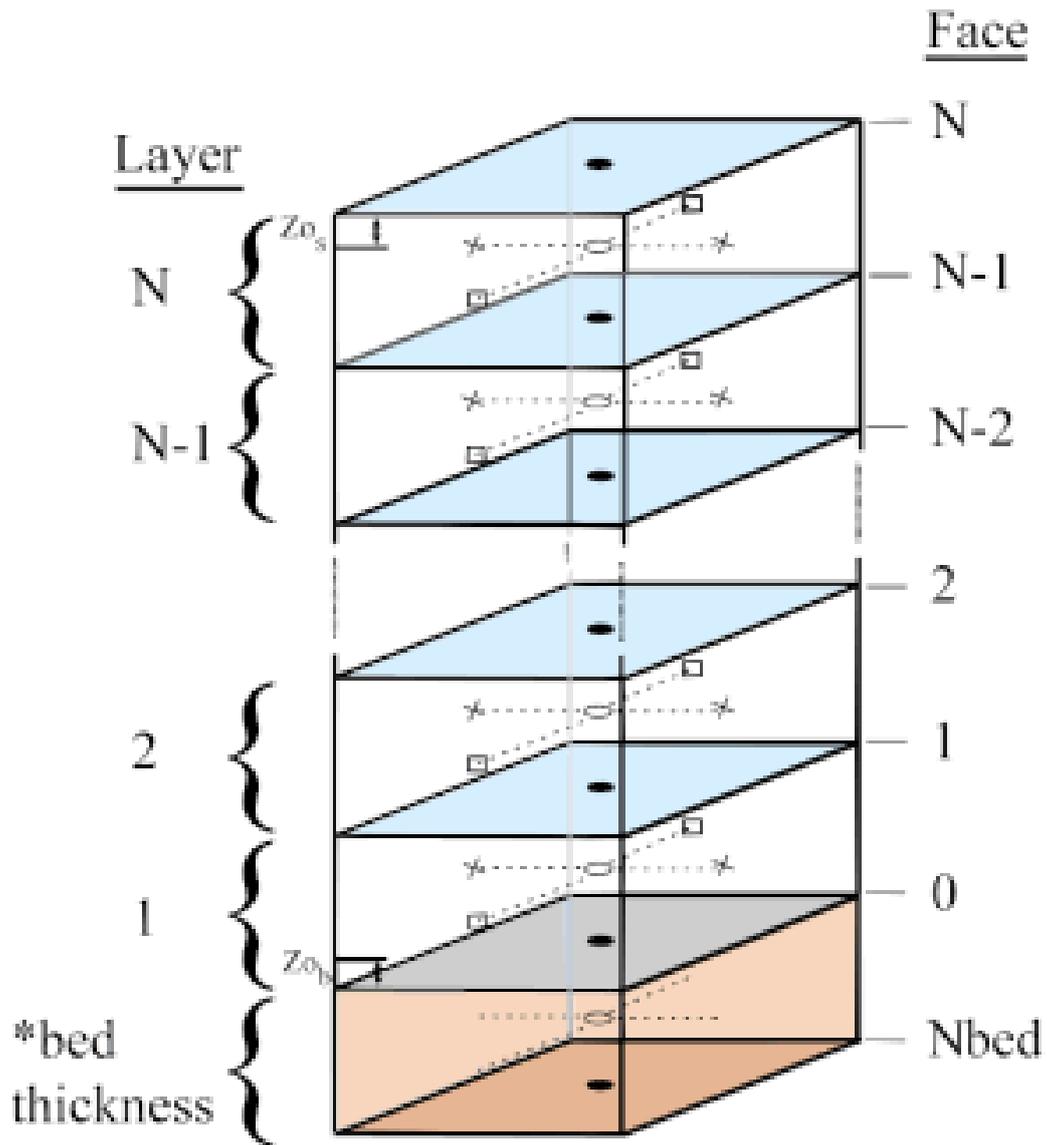


Figura A.2: Ubicación de variables sobre una grilla vertical escalonada, donde los cuadrados corresponden a u , las x a v y los círculos negros el resto de las variables. Cada N corresponde a una capa sigma. Figura tomada de la página de ROMS (<http://roms.mpl.ird.fr>)

Apéndice B

Surgencia Costera

La surgencia es un fenómeno oceanográfico que consiste en un movimiento vertical donde las masas de agua ascienden desde niveles profundos hacia la superficie. En el hemisferio sur ocurre por efecto coriolis cuando el viento que sopla hacia el norte produce un transporte neto perpendicular de las aguas superficiales mar adentro y un posterior ascenso de aguas subsuperficiales por continuidad (Fig. B.1). Este fenómeno es principalmente afectado por el forzamiento del viento, pero influyen muchos más factores tales como: dinámica de Ekman, geostrofia, estratificación, topografía (Preller and O'Brien, 1980) y procesos de mezcla verticales (Saenko and Weaver, 2003) entre otros. Tomaremos el desarrollo matemático desde Cushman and Roisin (2000).

En la superficie del océano, el viento generará una corriente superficial:

$$-fv = A_v \frac{d^2 u}{dz^2} \quad (\text{B.1})$$

$$fu = A_v \frac{d^2 v}{dz^2} \quad (\text{B.2})$$

donde A_v , f , u y v son la fricción vertical, el parámetro de Coriolis y las componentes zonal y meridional del viento respectivamente. $u, v \rightarrow 0$ cuando $z \rightarrow -\infty$

$$A_v \frac{du}{dz} = \tau^x \quad (\text{B.3})$$

$$A_v \frac{dv}{dz} = \tau^y \quad (\text{B.4})$$

en $z = 0$ encontramos las siguientes soluciones:

$$u = \frac{\sqrt{2}}{\rho f d} e^{z/d} \left[\tau^x \cos\left(\frac{z}{d} - \frac{\pi}{4}\right) - \tau^y \sin\left(\frac{z}{d} - \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (\text{B.5})$$

$$v = \frac{\sqrt{2}}{\rho f d} e^{z/d} \left[\tau^x \sin\left(\frac{z}{d} - \frac{\pi}{4}\right) + \tau^y \cos\left(\frac{z}{d} - \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (\text{B.6})$$

donde u y v son las velocidades producidas por el esfuerzo del viento (velocidades de Ekman). Para el caso de flujos geostroficos en el interior, se tiene $u = u_g + u_e$ y $v = v_g + v_e$.

Por otra parte si integramos (A.3) y (A.4) obtenemos el transporte de Ekman:

$$fV = -A_v \frac{du}{dz} = \tau^x \quad (\text{B.7})$$

$$fU = A_v \frac{dv}{dz} = \tau^y \quad (\text{B.8})$$

donde $U = \int_{-\infty}^0 u dz$ y $V = \int_{-\infty}^0 v dz$. Entonces:

$$U = \frac{\tau^y}{\rho f} \quad (\text{B.9})$$

$$V = -\frac{\tau^x}{\rho f} \quad (\text{B.10})$$

De este modo los vientos que soplan sobre el océano generan la capa de Ekman y corrientes. Las corrientes profundidad-promedio, llamadas deriva de Ekman, forman un ángulo con el viento que resulta ser 90° a la izquierda en el hemisferio sur (Fig. B.2). La deriva es mar adentro si el viento sopla con la costa en la parte izquierda o derecha en el hemisferio norte o sur, respectivamente. Si este es el caso, el agua disminuye en la capa superior en conjunto con una baja presión, forzando a las aguas de más abajo a moverse hacia arriba y reponer la divergencia del transporte de Ekman por principio de continuidad.

Las ecuaciones (A.9) y (A.10) solo nos relacionan corrientes con esfuerzo del viento, para considerar de manera sencilla lo que pasa en la vertical. Consideremos la fuerza de Coriolis como sigue:

$$F_{co} = -2\Omega \times \vec{v}_r \quad (\text{B.11})$$

donde Ω es la frecuencia angular de la Tierra y \vec{v}_r es la velocidad de la masa de agua. Esta fuerza se trata generalmente de dos maneras: aproximación plano- f y aproximación plano- β . La aproximación al plano- f consiste en suponer que los efectos de la esfericidad no son importantes, ya que el flujo es de limitada extensión latitudinal, lo que implica que el parámetro de Coriolis es constante y la aproximación al plano- β consiste en suponer que la componente vertical de la rotación varía con la latitud de manera lineal, es decir de la forma $f = f_0 + \beta y$, donde $f_0 = 2\Omega \sin \phi$ y $\beta = \frac{\partial f}{\partial y}$.

Ahora consideremos un océano con gravedad reducida sobre un plano- f ($f > 0$), delimitado por una pared vertical y sometido a un estrés superficial actuando con la pared sobre su izquierda. La capa superior en movimiento, pretende incluir toda la extensión vertical de la capa de Ekman, admitiendo una corriente de deriva mar adentro. La capa inferior es en virtud del modelo elegido infinitamente profunda e inmóvil. En ausencia de variaciones longitudinales, tenemos las ecuaciones de movimiento para u y v (A.12, A.13) y la ecuación de continuidad (A.14).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} - fv = -g' \frac{\partial h}{\partial x} \quad (\text{B.12})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + fu = \frac{\tau}{\rho_0 h} \quad (\text{B.13})$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) = 0 \quad (\text{B.14})$$

donde x es la coordenada mar adentro, τ es el estrés del viento longitudinal y todos los otros simbolos son los convencionales.

Estas ecuaciones son no lineales y no poseen solución analítica conocida. Linealizando y asumiendo que el estrés del viento τ y las reacciones del océano son débiles. Notamos $h = H - \eta$, donde H es la profundidad de la capa superior inalterada y η es el pequeño desplazamiento hacia arriba de la interfaz, tenemos:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv = g' \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (\text{B.15})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fv = \frac{\tau}{\rho_0 H} \quad (\text{B.16})$$

$$-\frac{\partial \eta}{\partial t} + H \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (\text{B.17})$$

Las condiciones de borde son: u desaparece en la costa ($x=0$) y η desaparece mar adentro ($x \rightarrow +\infty$). La solución depende de las condiciones iniciales, que pueden tomarse para que correspondan al estado en reposo ($u = v = \eta = 0$). Sin embargo, debido al carácter fluctuante de los vientos, la surgencia es rara vez un hecho aislado en el tiempo y se prefiere investigar las soluciones periódicas a las anteriores ecuaciones lineales.

Tomando $\tau = \tau_0 \sin \omega t$, donde τ_0 es una constante, la solución debe ser del tipo $u = u_0 \sin \omega t$, $v = v_0 \cos \omega t$ y $\eta = \eta_0 \cos \omega t$, sustituyendo en la ecuaciones diferenciales, tenemos:

$$u = \frac{f \tau_0}{\rho_0 H (f^2 - \omega^2)} \left[1 - \exp\left(-\frac{x}{R_\omega}\right) \right] \sin \omega t \quad (\text{B.18})$$

$$v = \frac{\omega \tau_0}{\rho_0 H (f^2 - \omega^2)} \left[1 - \frac{f^2}{\omega^2} \exp\left(-\frac{x}{R_\omega}\right) \right] \cos \omega t \quad (\text{B.19})$$

$$\eta = -\frac{f R_\omega \tau_0}{\rho_0 g' H \omega} \exp\left(-\frac{x}{R_\omega}\right) \cos \omega t \quad (\text{B.20})$$

donde R_ω es un radio de deformación modificado definido como:

$$R_\omega = \sqrt{\frac{g' H}{f^2 - \omega^2}} \quad (\text{B.21})$$

De la anterior solución, se concluye que la señal de surgencia es atrapada a lo largo de la costa a una distancia del orden de R_ω . Para mar adentro ($x \rightarrow \infty$), el desplazamiento interfacial desaparece, y el campo del flujo se reduce a la deriva de Ekman.

$$u_{Ek} = \frac{\tau_0}{\rho_0 f H} \sin \omega t, \quad v_{Ek} = 0 \quad (\text{B.22})$$

En la que se suponen oscilaciones inerciales para períodos largos, como semanas o meses ($\omega \ll f$), la distancia R_ω se convierte en el radio de deformación, los desplazamientos verticales son muy largos y el campo de oscilaciones inerciales es mucho más pequeño que la deriva de Ekman. Para frecuencias super inerciales ($\omega > f$), R_ω es imaginario, indicando que la solución no decae fuera de la costa, pero oscila.

B.0.1. Esfuerzo del Viento

En dinámica oceánica, los campos de viento tienen un rol vital en las condiciones de borde superficial. Su modelación exige un consistente conjunto de datos del esfuerzo del viento (τ), implicando que los campos globales de τ sean actualizados con la mejor información disponible (Hellerman and Rosenstein, 1983).

Comunmente para estudiar la dinámica de la surgencia costera se utilizan mediciones satelitales de viento obtenidos desde QuikSCAT o ERS. Ambos pueden presentar diferencias en zonas específicas como en el ciclo estacional o en el cálculo del rotor o esfuerzo del viento, el cuál puede llegar a ser 3 veces más grande en QuikSCAT que en ERS (Croquette et al., 2007). Para estos dos satélites en un período particular Croquette et al. (2007) en la zona entre los 17 y 26 °S encontró diferencias en la media de 2 m/s en velocidad, en 20 ° en dirección, con una correlación de 0.95 para vientos entre 3 y 20 m/s. Esta diferencia se puede explicar por la diferencia en período de tiempo para calcular el ciclo estacional y por la diferencia en la resolución espacial y temporal.

También podemos utilizar climatologías promedios como condiciones de borde superficial. COADS2005 es una recolección de datos de cruceros oceanográficos, boyas, anclajes y diversas mediciones entre los años 1945-1989 interpolados a una resolución de 50 km, con promedios mensuales (12 datos, 1 dato por mes). Consiste del flujo de agua fresca, la radiación solar de onda corta y el esfuerzo del viento.

El esfuerzo del viento se puede tratar como una función dependiente de la magnitud del viento (Sverdrup, 1947), de la siguiente manera:

$$|\tau| = \rho C_D (u^2 + v^2) \quad (\text{B.23})$$

donde $|\tau|$ es la magnitud del vector esfuerzo del viento, ρ es la densidad del aire en la interface atmósfera-océano, C_D es el coeficiente de arrastre y u, v son las componentes zonal y meridional de la velocidad del viento a 10 m, respectivamente.

Separando en componentes zonal y meridional se llega a:

$$\tau^x = \rho C_D u (u^2 + v^2)^{1/2} \quad (\text{B.24})$$

$$\tau^y = \rho C_D v (u^2 + v^2)^{1/2} \quad (\text{B.25})$$

El C_D es un término complicado de obtener, por lo que existen diferentes formas de obtener una aproximación de su valor. En la literatura se encuentra como un valor constante, una función que depende sólo de la velocidad del viento o como una función que depende del viento y de la estabilidad (Hellerman and Rosenstein, 1983).

En esta tesis, utilizaremos el esquema Large and Pond (1981) para calcular el esfuerzo del viento a partir de las climatologías de COADS y QuikSCAT. Esta parametrización tiene un origen experimental: consistió de 1591 datos de coeficientes de arrastre, los cuales fueron promediados para cada banda de velocidad U a 10 metros ($U10$). El mejor ajuste a estos puntos resultó ser, el cual podemos visualizar en la figura B.3. :

$$10^3 C_D = \begin{cases} 1.14 & 4 < U_{10} \leq 10 \text{ ms}^{-1} \\ 0,49 + 0,065U_{10} & 10 < U_{10} < 26 \text{ ms}^{-1} \end{cases} \quad (\text{B.26})$$

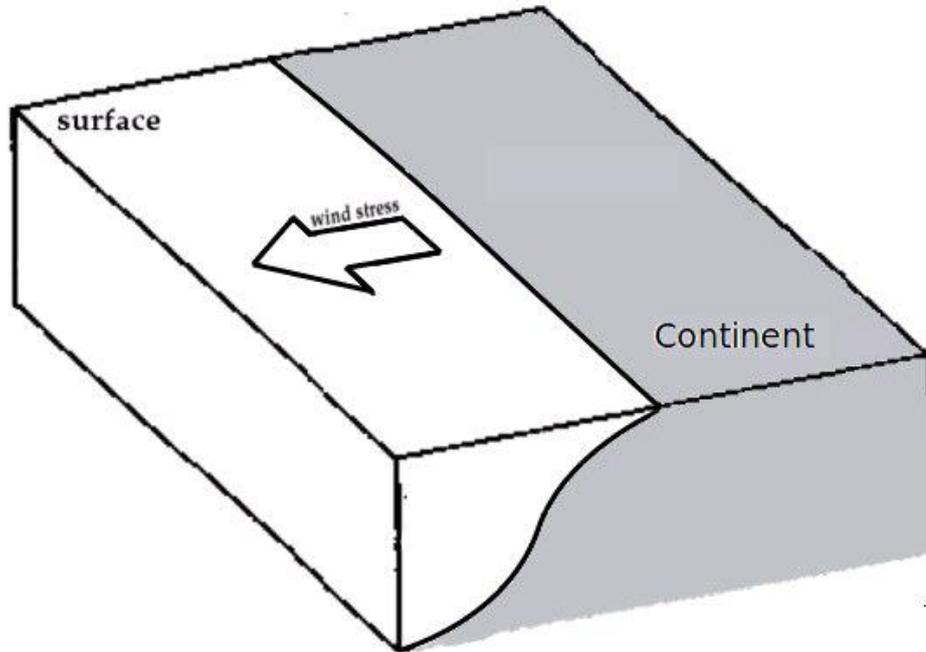


Figura B.1: Esquema de surgencia costera en el hemisferio sur. El viento sopla desde el sur generando un esfuerzo del viento mar adentro por efecto Coriolis. Esto se traduce en un transporte superficial de masas de agua en la superficie y un ascenso de aguas subsuperficiales.

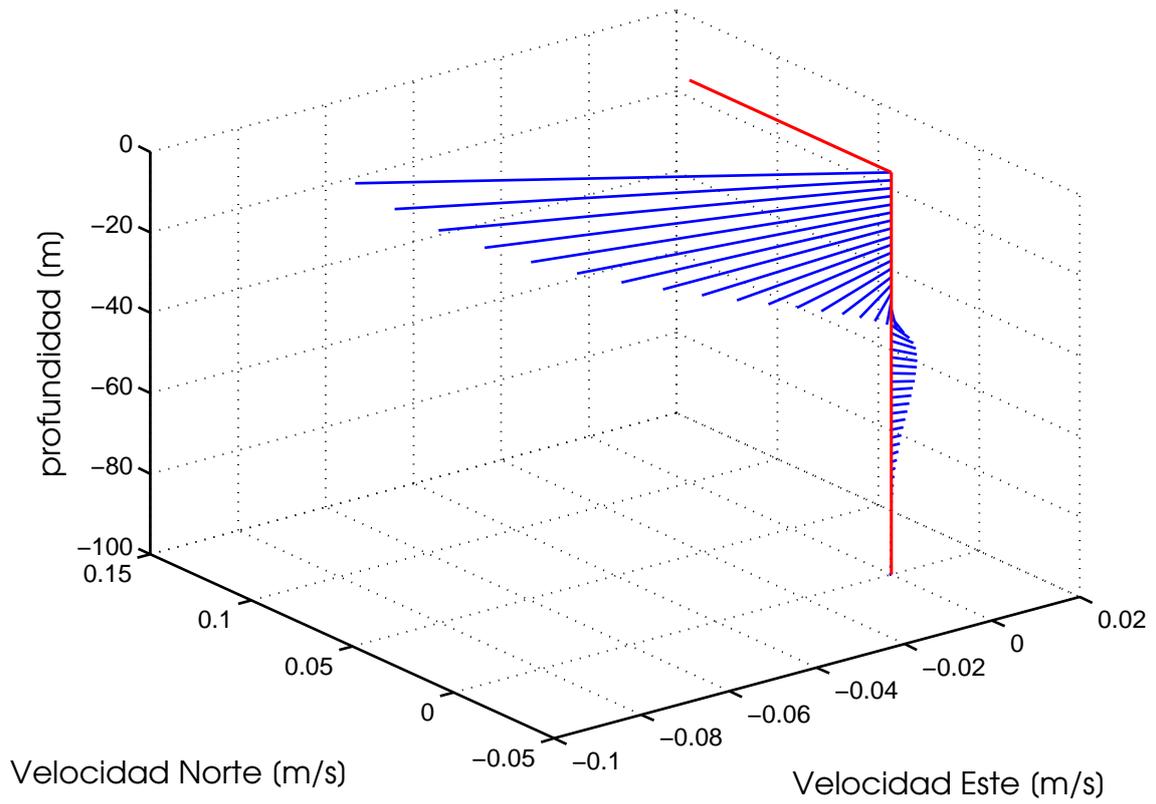


Figura B.2: Espiral de Ekman en el hemisferio sur. Podemos notar como las magnitudes y dirección de las velocidades cambian en función de la profundidad. Figura tomada desde ?

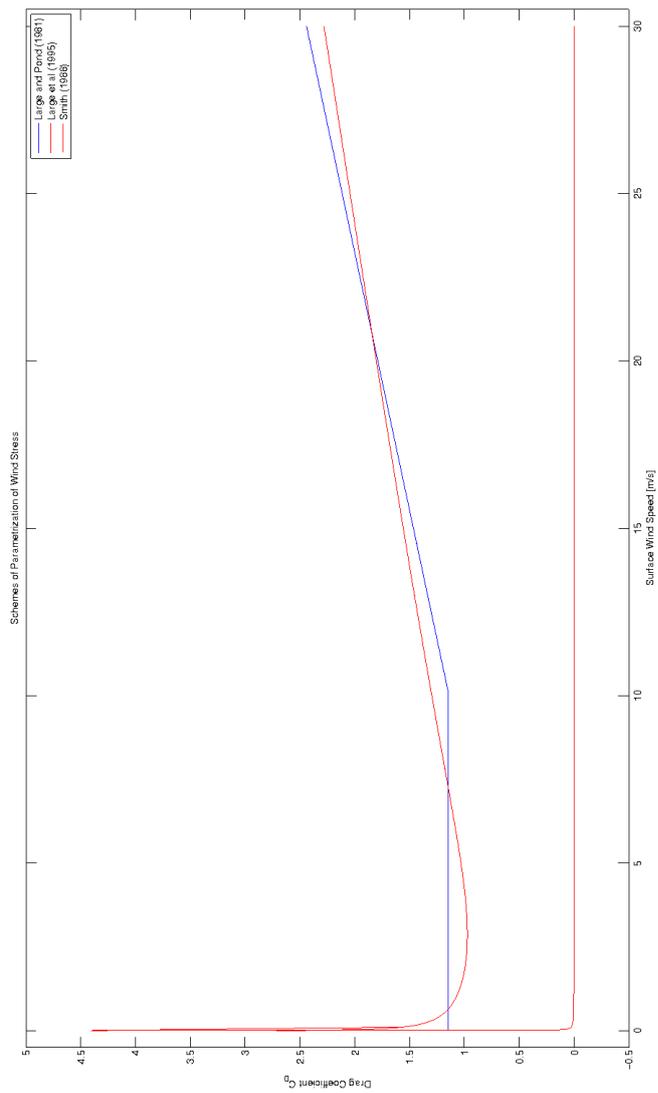


Figura B.3: Comparación entre los valores obtenidos de coeficiente de arrastre en función de un viento ficticio entre los 0 y 30 [m/s], una altura de 10 [m] y una temperatura de 15 ° utilizando las parametrizaciones de Large and Pond (1981), Large et al. (1995) y Smith (1988). En esta tesis, utilizaremos sólo el esquema Large and Pond (1981) para calcular el esfuerzo del viento en las climatologías de COADS y QuikSCAT

Apéndice C

Morfología Matemática

Definición

La morfología matemática (MM) o simplemente morfología puede ser definida como una teoría para el análisis de estructuras espaciales. Es llamada morfología por que tiene como objetivo analizar el aspecto y la forma de los objetos. Esto es matemática en el sentido que el análisis es basado sobre un conjunto teórico, geometría integral y álgebra. La MM no es solo una teoría, es una poderosa técnica de análisis de imágenes (Soille, 2003).

Propiedades

Toda operación morfológica es el resultado de una o más operaciones de conjuntos (unión, intersección, complementación, etc.) haciendo intervenir dos conjuntos X , Y , ambos subconjuntos de un conjunto espacio Z . De los dos subconjuntos, Y recibe el nombre de elemento estructurante que, para operar con X , se desplazará a través del espacio Z . Las operaciones morfológicas, transformaciones de conjuntos $\psi(X)$, satisfacen, entre otras, las siguientes propiedades:

1. Invariabilidad a translación

$$\psi(X_p) = (\psi(X_p))_p$$

donde p es el factor de translación del conjunto.

2. Compatibilidad con las homotecias

Supongamos que λX es una homotecia de un conjunto de puntos X , por tanto, las coordenadas de cada punto del conjunto se multiplican por alguna constante positiva λ . Esto es equivalente a cambiar de escala con respecto a algún origen. Si ψ no depende de la escala, es invariante al cambio de escala:

$$\psi(\lambda X) = \lambda X \psi(X)$$

3. Conocimiento local

La transformación morfológica ψ posee el principio de conocimiento local si para cualquier conjunto de puntos M , subconjunto del dominio N , la transformación del conjunto X restringido al dominio de M , y después restringido al dominio N , es equivalente a aplicar la transformación $\psi(X)$ y restringir el resultado en M :

$$\psi(X \cap N) \cap M = \psi(X) \cap M$$

4. Continuidad

En forma resumida, este principio afirma que la transformación morfológica ψ no exhibe ningún cambio abrupto. La noción de continuidad depende de la noción de vecindad, es decir, de la topología. Dependiendo del tipo de operación morfológica se cumplirán otra serie de propiedades, como la idempotencia, extensividad, antiextensividad, etc.

Filtrado Morfológico

Un filtro morfológico es cualquier transformación no lineal, en un retículo completo, creciente e idempotente. El requerimiento de creciente es fundamental, pues asegura la conservación del orden del retículo después del filtrado. En palabras simples, nuestro filtro funciona de la siguiente manera: Sea una matriz I :

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

si le aplicamos un filtrado morfológico se obtiene

$$IF = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

es decir básicamente, rellena los agujeros '0' por datos '1'. La cantidad de ceros que rellena puede ser regulada.

Esqueleto morfológico

Suponga que se tiene una familia infinita numerable de elementos estructurales de la siguiente forma:

$$H = \{B_0, B_1, B_2, B_3, \dots\}$$

con B_0 conteniendo únicamente el origen del espacio de trabajo X , i.e $B_0 = 0$; $B_1 \subseteq X$ un elemento de estructura que cumple con B_1 finito, $B_1 \neq B_0$, $B_0 \subseteq B_1$ y $B_i = B_{i-1} \oplus B_1$ para $i = 1, 2, 3, \dots, n$. Por otro lado, el esqueleto morfológico de una región o conjunto A , se define directamente en función de erosiones y aperturas como sigue:

Sean A, B subconjuntos de X y sea la familia de elementos estructurantes H como se definió anteriormente. El esqueleto morfológico de A , dado B , queda expresado por:

$$S(A) = \bigcup_{k=0}^K S_k(A)$$

con $S_k(A) = (A \ominus B_k) - (A \ominus B_k) \circ B_1$ y donde K es un número natural tal que $K = \min\{k | A \ominus B_k = \emptyset\}$ (Gamino, 2004)

Apéndice D

Análisis EOFs

Las EOFs proveen una descripción compacta de la variabilidad espacial y temporal de series de datos en términos de 'modos' estadísticos (componentes ortogonales). Es aplicado como un método para separar la señal del ruido de fondo. Para un correcto uso de esta herramienta, se recomienda:

1. Restituir los datos faltantes mediante interpolación o hacerlos iguales a cero
2. Normalizar los datos, removiendo el promedio y la desviación estándar
3. Remover el ciclo anual
4. Multiplicarlos por el seno de la latitud

Los datos deben ser organizados en una matriz 2D de espacio-tiempo. Luego, se calcula su matriz de covarianza R_{FF} . Esta se descompone en matrices E (EOFs) y λ , de tal forma que

$$R_{FF} * E = E * \lambda$$

Las EOFs son la comprensión estadística más eficiente de la variabilidad (numérica) de los datos. La variabilidad en cada EOF no necesariamente corresponde con los modos de variabilidad física, pues la variabilidad de un proceso físico puede estar en varias EOFs.

A continuación se muestran las figuras que resultaron del análisis de EOFs usando τ_x y τ_y de COADS y QuikSCAT. En estas, se puede observar la buena correlación tanto espacial, como temporal, no así en frecuencia.

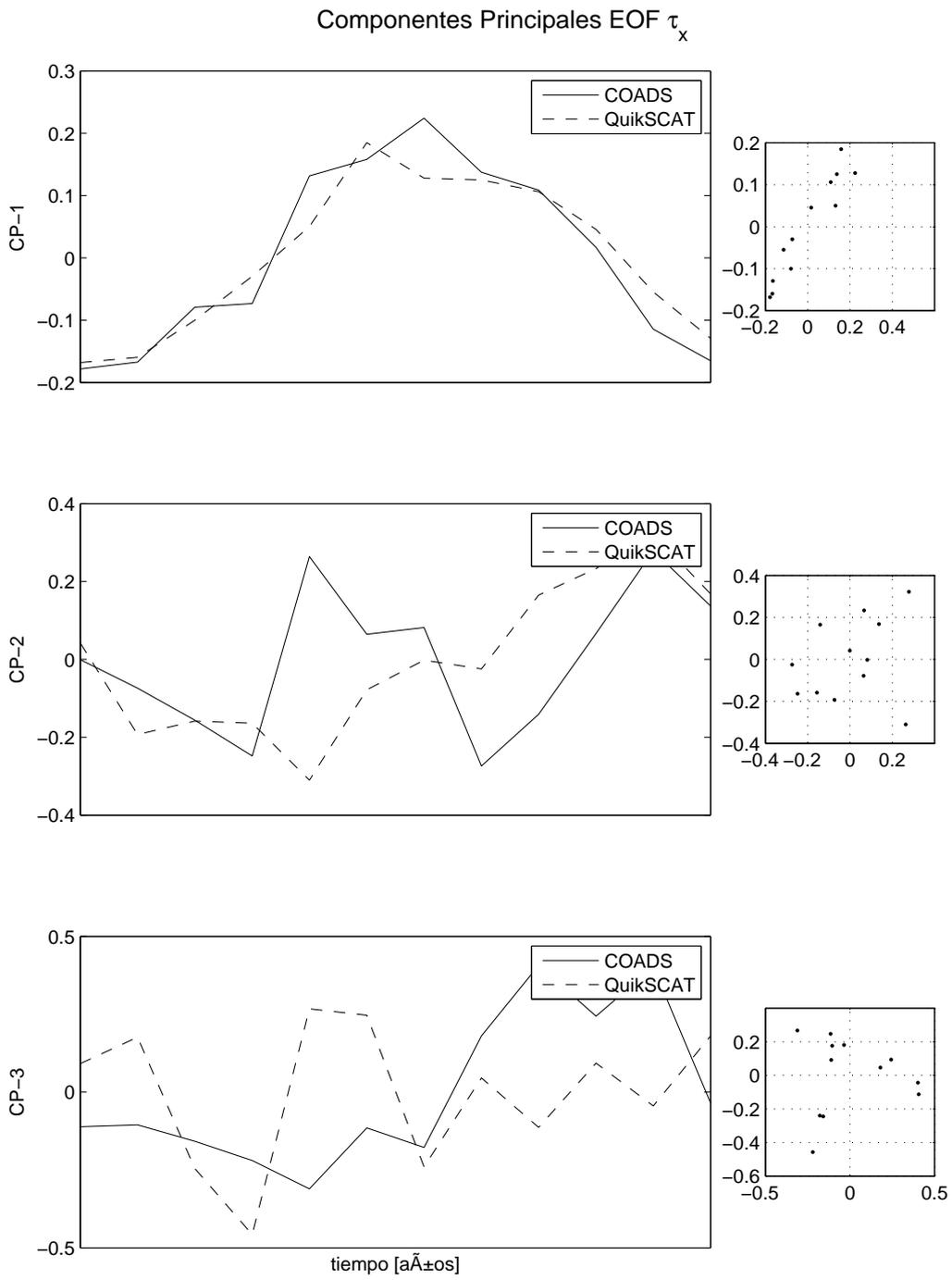


Figura D.1: Validación en el tiempo para los componentes principales de EOFs usando τ_x de COADS y QuikSCAT.

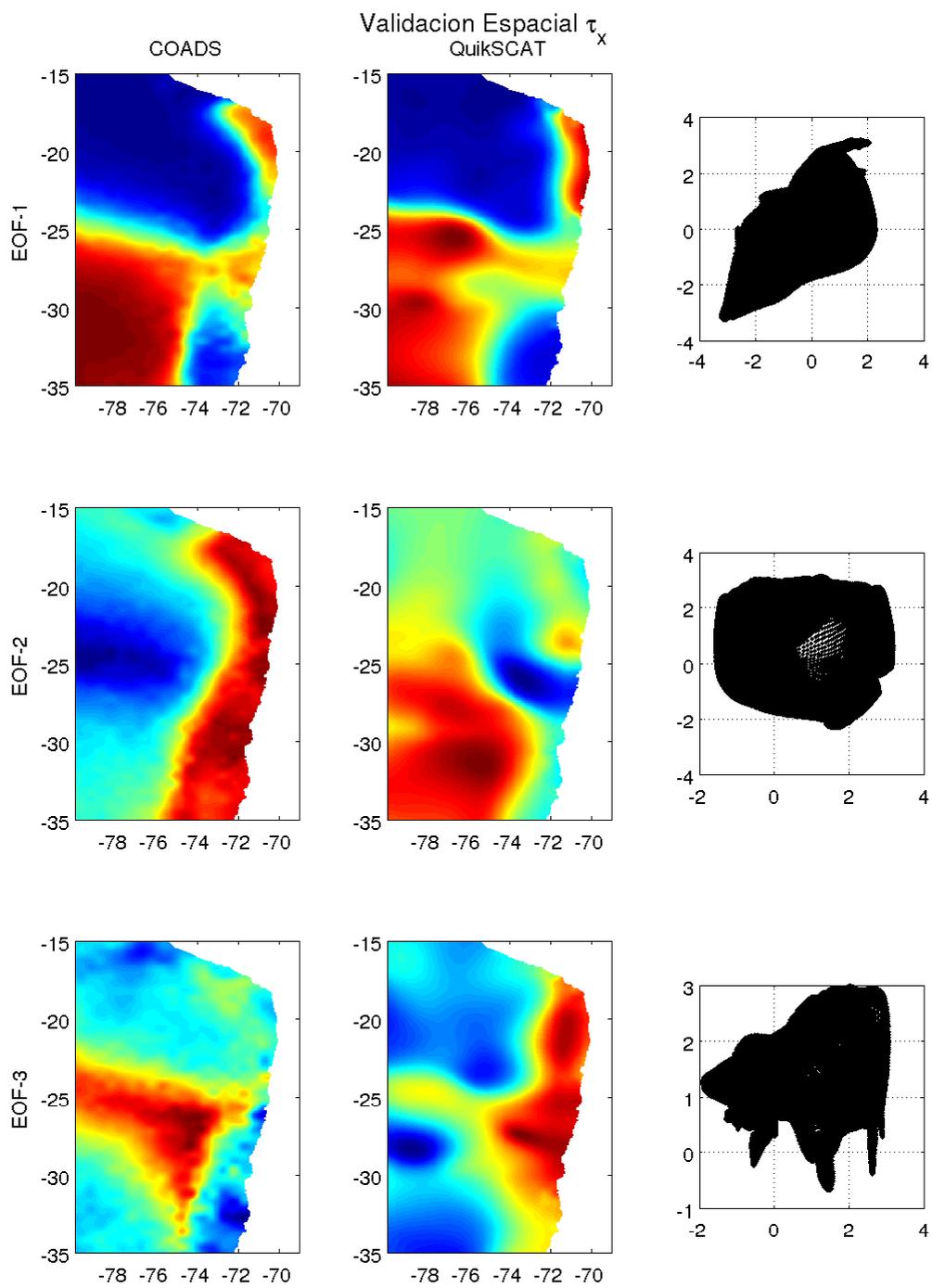


Figura D.2: Validación en el espacio para los componentes principales de EOFs usando τ_x de COADS y QuikSCAT.

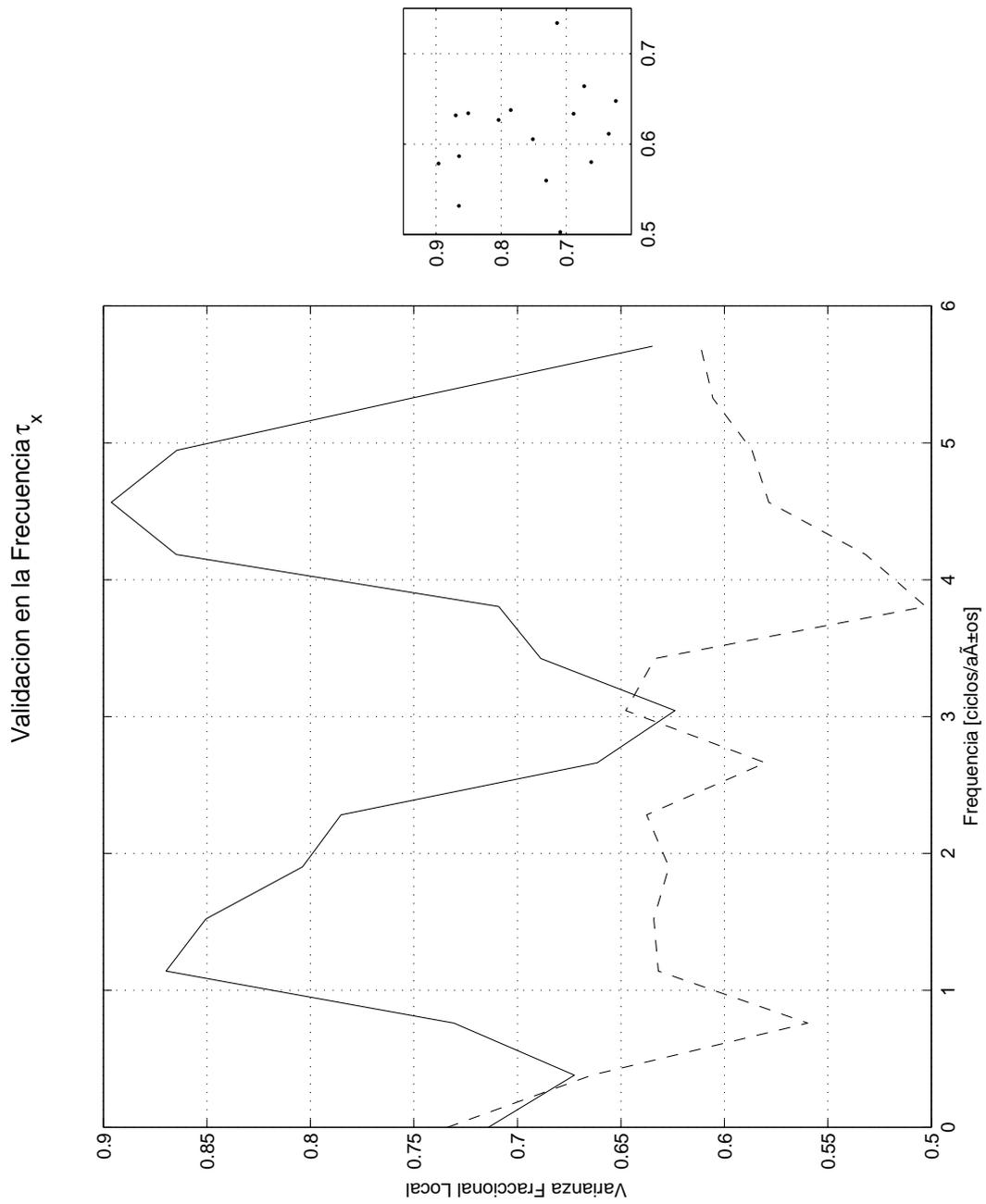


Figura D.3: Validación en la frecuencia para los componentes principales de EOFs usando τ_x de COADS y QuikSCAT.

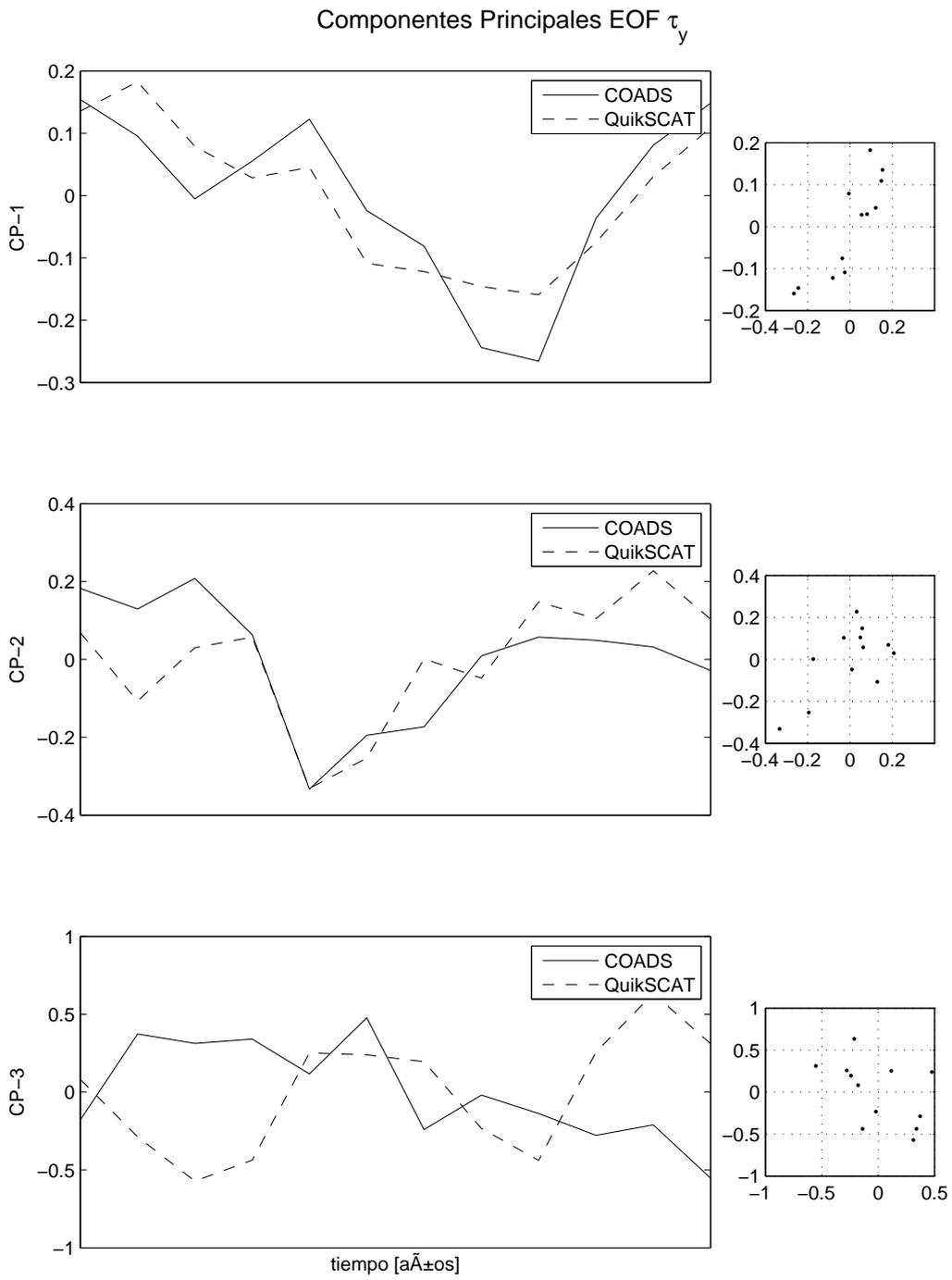


Figura D.4: Validación en el tiempo para los componentes principales de EOFs usando τ_y de COADS y QuikSCAT.

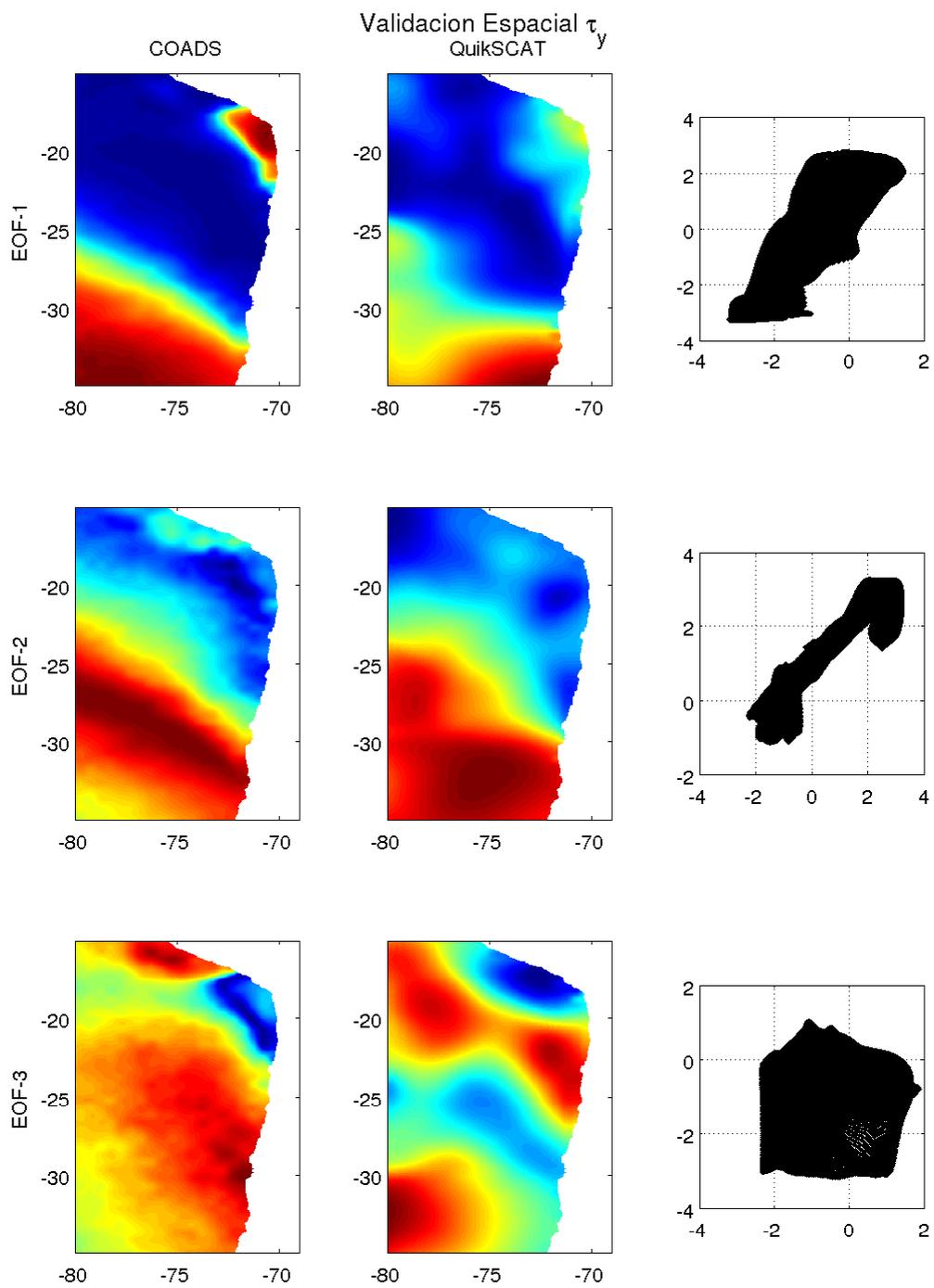


Figura D.5: Validación en el espacio para los componentes principales de EOFs usando τ_y de COADS y QuikSCAT.

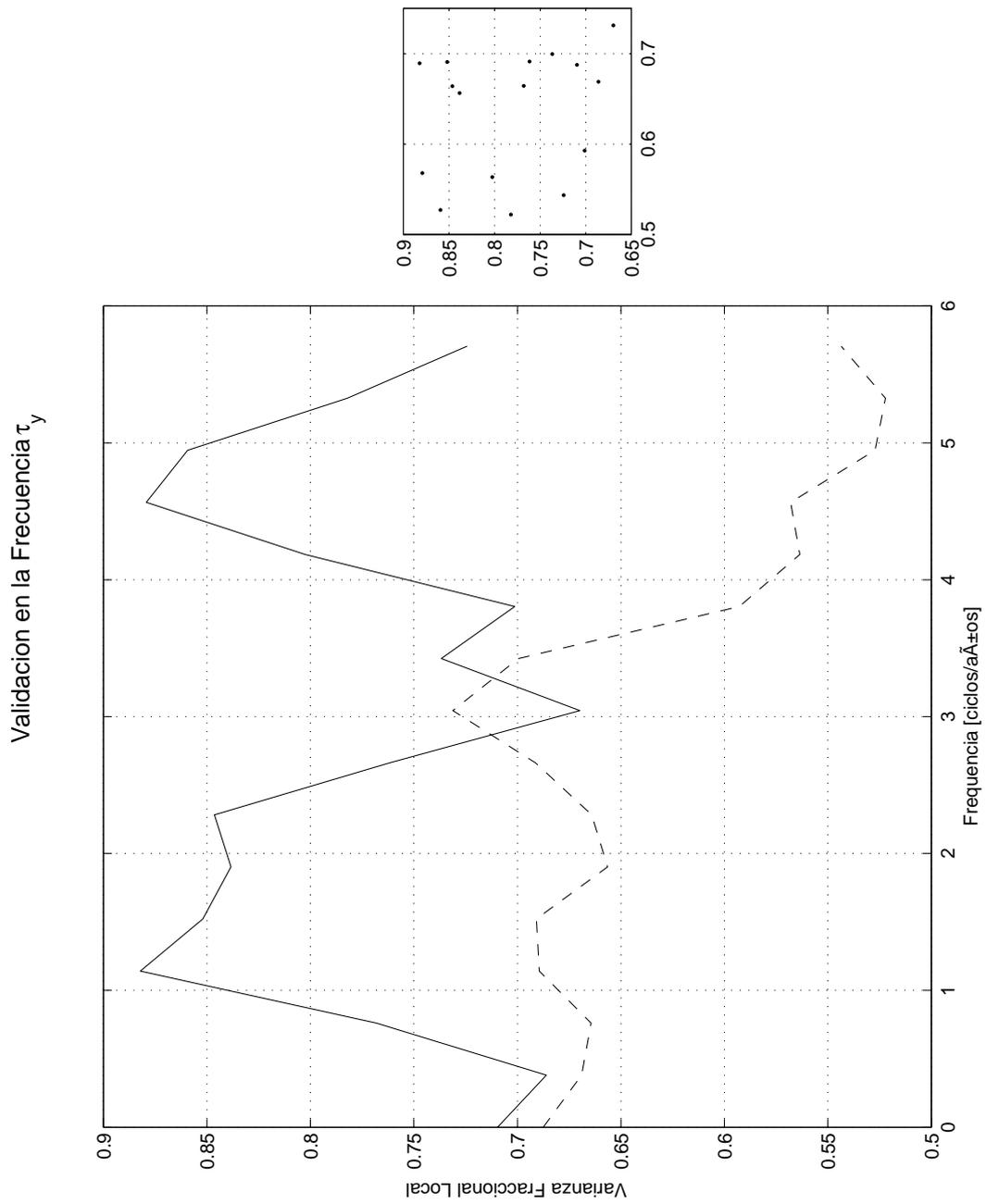


Figura D.6: Validación en la frecuencia para los componentes principales de EOFs usando τ_y de COADS y QuikSCAT.

Bibliografía

- Arakawa, A. and Lamb, V. R. (1981). A potential enstrophy and energy conserving scheme for the shallow water equations. *Monthly weather review*, 109:18–36.
- Batteen, M. L., Lopes da Costa, C. N., and Nelson, C. S. (1992). A numerical study of wind stress curl effects on eddies and filaments off the northwest coast of the iberian peninsula. *Journal of Marine Systems*, 3:249–266.
- Blanke, B., Speich, S., Bentamy, A., Roy, C., and Sow, B. (2005). Modeling the structure and variability of the southern benguela upwelling using quikscat wind forcing. *Journal of Geophysical Research*, 110:C07018.
- Brieva, D. (2010). Estudio de la sensibilidad en simulaciones numéricas de filamentos de surgencia en la costa norte de chile. BsSc Thesis.
- Brieva, D., Sepúlveda, H. H., and Artal, O. E. (2010). Numerical simulation of upwelling filaments in the northern coast of chile: Sensitivity studies. Submitted to Ciencias Marinas Journal.
- Caceres, M. (1992). Vórtices y filamentos observados en imágenes de satélite frente al área de surgencia de talcahuano, chile central. *Investigaciones Pesqueras*, 37:55–66.
- Conkright, M. E., Locarnini, H. E., Garcia, T. D., Brien, O., Boyer, T. P., Stephens, C., and Antonov, J. I. (2002). World ocean atlas 2001: Objective analyses, data statistics, and figures, cd-rom documentation. Technical report, National Oceanographic Data Center, Silver Spring, MD, 17 pp.
- Croquette, M., Eldin, G., Grados, C., and Tamayo, M. (2007). On differences in satellite wind products and their effects in estimating coastal upwelling processes in the south-east pacific. *Geophysical Research Letters*, 34:L11608.
- Cushman, B. and Roisin (2000). *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Da Silva, N., Young, C. C., and Levitus, S. (1994). Atlas of surface marine data 1994, vol. 1,. Technical report, NOAA Atlas NESDIS 6, U. S. Department of Commerce, 74 pp.
- Dewey, R. K., Moum, J. N., Paulson, C. A., Caldwell, D. R., and Pierce, S. D. (1991). Structure and dynamics of a coastal filament. *Journal of Geophysical Research*, 96(C8):14885–14907.

- Gamino, A. (2004). *Operaciones morfológicas rápidas por descomposición del elemento de estructura mediante discos*. PhD thesis, CENTRO DE INVESTIGACION Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL.
- Gargett, A. and Holloway, G. (1984). Dissipation and diffusion by internal wave breaking. *Journal Marine Research*, 42:15–27.
- Garreaud, R. D. and Rutllant, J. A. (2006). Variabilidad atmosférica de alta frecuencia en el borde oriental del anticiclón del pacífico sureste. *Ciencia y Tecnología*, 29(1):5–13.
- Glasbey, C. A. and Horgan, G. W. (1995). *Image Analysis for the Biological Sciences*. Jhon Willey & Sons.
- Gonzalez, R. C., Woods, R. E., and Eddins, S. L. (2003). *Digital image processing using MATLAB*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA.
- Grob, C., Quiñones, R. A., and Figueroa, D. (2003). Cuantificación del transporte de agua costa-océano a través de filamentos y remolinos ricos en clorofila a, en la zona centro-sur de Chile (35,5 – 37,5°S). *Gayana*, 67(1):55–67.
- Haidvogel, D. B., Beckman, A., and Hedstrom, K. S. (1991). Dynamical simulations of filament formation and evolution in the coastal transition zone. *Journal of Geophysical Research*, 96(C8):15017–15040.
- Hellerman, S. and Rosenstein, M. (1983). Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates. *Journal of Physical Oceanography*, 13:1093–1104.
- Large, W., Morzel, J., and Crawford, G. B. (1995). Accounting for surface wave distortion of the marine wind profile in low-level ocean storms wind measurements. *Journal Physical Oceanography*, 25:2959–2971.
- Large, W. G., McWilliams, J. C., and Doney, S. C. (1994). Oceanic vertical mixing: A review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization. *Reviews of Geophysical*, 32(4):363–403.
- Large, W. G. and Pond, S. (1981). Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds. *Journal of Physical Oceanography*, 11:324–336.
- Lutjeharms, J. R. E., Shillington, F. A., and Duncombe Rae, C. M. (1991). Observations of extreme upwelling filaments in the southeast Atlantic ocean. *Science*, 253:774–775.
- Marchesiello, P., McWilliams, J. C., and Shchepetkin, A. (2001). Open boundary conditions for long-term integration of regional oceanic models. *Ocean Modelling*, 3:1–20.
- Marín, V. H., Delgado, L. E., and Escribano, R. (2003). Upwelling shadows at Mejillones bay (northern Chilean coast): a remote sensing in situ analysis. *Investigaciones Marinas*, 31(2):47–55.
- Mellor, G. L. and Yamada, T. (1982). Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysical and Space Physics*, 20(4):851–875.

- Mery, D. (2006). On automated radiosopic inspection of aluminum die castings. *Materials Evaluation*, 64(2):135–143.
- Mery, D. and Soto, A. (2008). Features: The more the better. In *The 7th WSEAS International Conference on Signal Processing, Computational Geometry and Artificial Vision (ISCGAV-2008), Rodos Island, Greece*.
- Michielsen, K., De Raedt, H., and Kawakatsu, T. (2000). *Morphological Image Analysis*, volume 86. Springer Proceedings in Physics, Springer, Berlin.
- Pajares, G. and De la Cruz, J. M. (2001). Clasificación de texturas naturales mediante k-means. *Revista Electronica de Visión Por Computador*, 6:1–18.
- Penven, P., Marchesiello, P., Debreu, L., and Lefevre, J. (2007). Software tools for pre- and post-processing of oceanic regional simulations. *Environmental Modelling & Software*, xx:1–3.
- Preller, R. and O’Brien, J. J. (1980). The influence of bottom topography on upwelling off peru. *Journal of Physical Oceanography*, 10(9):1377–1398.
- Ramp, S. R., Jessen, P. F., Brink, K. H., Niiler, P. P., Daggett, F. L., and Best, J. S. (1991). The physical structure of cold filaments near point arena, california, during june 1987. *Journal of Geophysical Research*, 96(C8):14859–14883.
- Robusto, C. C. (1957). The cosine-haversine formula. *The American Mathematical Monthly*, 64(1):38–40.
- Saenko, O. A. and Weaver, A. J. (2003). Southern ocean upwelling and eddies: sensitivity of the global overturning to the surface density range. *Tellus*, 55A:106–111.
- Shchepetkin, A. F. and McWilliams, J. C. (2005). The regional oceanic modeling system (roms): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*, 9:347–404.
- Silva, N. and Valdenegro, A. (2003). Evolución de un evento de surgencia frente a punta curauquilla, valparaíso. *Investigaciones Marinas*, 31(2):73–89.
- Smith, R. C. and Sandwell, D. (1997). Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science*, 277:1957–1962.
- Smith, S. D. (1988). Coefficients for sea surface wind stress, heat flux, and wind profiles as a function of wind speed and temperature. *Journal of Geophysical Research*, 93:15467–15472.
- Sobarzo, M. and Figueroa, D. (2001). The physical structure of a cold filament in a chilean upwelling zone (península de mejillones, chile, 23°s). *Deep-Sea Research I*, 48:2699–2726.
- Sobel, I. and Feldman, G. (1968). A 3x3 isotropic gradient operator for image processing. In *Presentation for Stanford Artificial Project*.

- Soille, P. (2003). *Morphological Image Analysis: Principles and Applications*. Springer, 2nd edition.
- Song, Y. and Haidvogel, D. B. (1994). A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate system. *Journal of Computational Physics*, 115:228–244.
- Sonka, M., Hlavac, V., and Boyle, R. (2008). *Image Processing: Analysis and Machine Vision*. Thomson Learning; 3rd Revised edition edition, Chapman -Hall, Cambridge.
- Strub, P., Kosro, P. M., and Huyer, A. (1991). The nature of the cold filaments in the california current system. *Journal of Geophysical Research*, 96:14743–14768.
- Sverdrup, H. U. (1947). Wind-driven currents in a baroclinic ocean: with application to the equatorial currents of the eastern pacific. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 33:318–326.
- Umlauf, L. and Burchard, H. (2003). A generic length-scale equation for geophysical turbulence models. *Journal of marine research*, 61(2):235–265.