



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA



**ESTUDIO DE LA SENSIBILIDAD EN
SIMULACIONES NUMÉRICAS DE
FILAMENTOS DE SURGENCIA EN LA COSTA
NORTE DE CHILE**

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE
GEOFÍSICO

Postulante: Daniel E. Brieva Álvarez
Tutor: Dr. Andrés Sepúlveda

Concepción - Chile
Enero 2010

Índice general

Agradecimientos	III
Resumen	V
1. Introducción	1
1.1. Descripción del Proceso de Surgencia	2
1.1.1. Transporte de Ekman	2
1.2. Descripción de la Región	5
2. Método	7
2.1. Configuraciones y Características Utilizadas de ROMS	10
2.1.1. Grilla	10
2.1.2. Condiciones Iniciales	11
2.1.3. Condiciones de Borde Superficial	12
2.1.4. Condiciones de Borde Laterales.	12
2.2. Clasificación de las Simulaciones	15
3. Resultados	17
3.1. Condiciones Modificadas	17
3.1.1. Resolución	17
3.1.2. Batimetría	17
3.1.3. Línea de Costa	19
3.2. Simulaciones	19
3.2.1. Resultados del Cálculo Paralelo	19
3.2.2. Clasificación y Resultados Generales	24
3.2.3. Resultados de Estabilidad	26
3.3. Validación Preliminar de los Resultados	28
3.3.1. Promedios Diarios de Temperatura Superficial	28
3.3.2. Promedios Mensuales de Temperatura Superficial	29
3.4. Filamentos	32

3.4.1. Identificación y Ubicación	32
3.4.2. Dimensiones, Transporte y Velocidad	40
4. Conclusiones y Discusiones	43
4.1. Sensibilidad	43
4.1.1. Línea de Costa	43
4.1.2. Resolución	44
4.1.3. Batimetría	44
4.2. Filamentos	44
4.3. Paralelización y Tiempo de cálculo	44
4.4. Dificultades y Problemas	45
4.5. Para continuar	45
A. ROMS AGRIF y ROMSTOOLS	47
A.1. ROMS AGRIF	47
B. Tablas de Filamentos	51
C. Paralelización	57
C.1. Interfase MPI	57
C.2. Interfase OpenMP	58
C.2.1. Implementación en ROMS	59
D. Mecánica de Fluidos	61
D.1. Conservación de Masa	61
D.2. Conservación de Momentum	63

Agradecimientos

Se agradece a todos aquellos que estuvieron involucrados en la investigación, principalmente al Dr. Andrés Sepúlveda como tutor, consejero y corrector de esta, así como el soporte financiero provisto por el proyecto FONDECYT 11080245 a cargo de la Universidad de Concepción.

Hemos de mencionar nuestra gratitud para con el Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción por acogernos dentro de su ambiente y por brindarnos diferentes oportunidades para nuestro desarrollo profesional durante los años de estudio, agradeciendo de forma especial al Dr Andrés Sepúlveda, Dr Dante Figueroa, Dr Elias Ovalle, Dr Samuel Hormazabal, Dr Aldo Montecinos y el Dr Alberto Foppiano.

Se reconoce y agradece el aporte brindado por las distintas amistades en aspectos técnicos como la redacción, programación, etc., resaltando de forma especial a Lorenzo Luengo, Marisol Inostroza, así como tantos otros que a través de los años me fueron entregando herramientas que me fueron de gran utilidad para esta investigación y el desarrollo de mis estudios.

Menciono a quienes más amo, mis seres queridos que me dieron el apoyo incondicional por tan largo tiempo, y lo continúan haciendo. A estos agradezco de todo corazón por cada esfuerzo realizado para entregarme la oportunidad de estudiar. En especial un emotivo gracias a mis padres Daniel Brieva y Rita Álvarez, junto con mis hermanos Elizabeth y Gabriel.

Finalmente darle las gracias a Dios por los cuidados y oportunidades que ha puesto en mi camino, buscando hacerme mejor persona y mantenerme a su lado durante mi caminar. Gracias mi Dios.

Resumen

Se estudió la sensibilidad de las simulaciones numéricas de filamentos de surgencia frente a factores como la resolución de la grilla, la suavidad de la batimetría y morfología de la línea de costa. Para ello se utilizó el modelo ROMS_AGRIF aplicado en la zona norte de la costa chilena (15°S - 35°S).

Los forzantes de viento fueron promedios mensuales con una interpolación lineal, para completar los 29 días faltantes. Las condiciones iniciales se interpolaron del World Ocean Atlas 2005 para la temperatura y salinidad. La configuración de Marchesiello ([Marchesiello et al., 2001]) fue utilizada para los bordes laterales. Y para poder utilizar una resolución de 5 km los cálculos se realizaron bajo una configuración de trabajo paralelo a través de la interfase MPI.

Los filamentos mostraron variaciones en su duración (días) frente a las variaciones de línea de costa, donde la línea de costa suavizada presentó los filamentos de menor duración. Esta variación impactó la duración de estos, también cambió el número total de filamentos por simulación. Las variaciones de resolución trabajaron como un filtro, donde se logró identificar los filamentos de grandes dimensiones pero perdiendo los más pequeños. Y finalmente los cambios de batimetría solo presentaron pequeños cambios en el número total de filamentos. Los lugares de mayor frecuencia se mantuvieron a través de las distintas simulaciones.

Capítulo 1

Introducción

El objetivo de esta tesis es realizar un estudio numérico de los filamentos de surgencia y el efecto de la resolución de la batimetría, línea de costa y grilla en la simulación de estos. Para el estudio numérico se utilizará el modelo ROMS_AGRIF. Para el estudio de los filamentos se utilizarán los resultados de las simulaciones junto con el conocimiento existente sobre el fenómeno de surgencia, transporte de Ekman, bombeo de Ekman y ecuaciones básicas de la mecánica de fluidos.

La surgencia costera ¹ puede observarse hoy en día gracias a la tecnología satelital presente, ya que las aguas que surgen por el transporte de Ekman presentan una temperatura menor a la superficial. De lo anterior, al realizar mediciones de la radiación proveniente de las aguas oceánicas y calcular la temperatura superficial, pueden identificarse las regiones costeras donde se está presentando este fenómeno. De estas mediciones podemos conocer las dimensiones superficiales, pero desconocemos lo que sucede bajo la superficie. Para poder conocer y lograr una comprensión de este fenómeno se han realizado mediciones in situ y desarrollado estudios numéricos, los cuales nos han dado una cierta idea de las dimensiones y características presentes en las tres dimensiones espaciales (longitud, latitud y profundidad) como en la temporal.

Dentro de la surgencia costera existe el caso cuando la surgencia es de tal magnitud que logra transportar masas de agua subsuperficial varios kilómetros hacia el océano. Este fenómeno es conocido como filamentos de surgencia costera por el hecho de ser largos y angostos, pudiendo presentar 100-200 de

¹Hemos de definir la surgencia como el simple hecho de que aguas profundas a través de un movimiento vertical afloren o surjan en la superficie oceánica. Costera por su ubicación y que están asociadas en general al viento, como se vera en la sección 1.1.1

kilómetros de largo con 10-50 de kilómetros de ancho [Sánchez et al., 2008]. La velocidad con la cual el agua proveniente de la surgencia se desplaza hacia el interior puede ser aproximada estudiando la evolución de la morfología del filamento. Existen también radares que nos pueden proveer el campo de velocidad superficial dentro de un cierto rango espacial. Pero nuevamente surge el punto de que toda nuestra información yace en la superficie a menos que tengamos mediciones in situ, que nos entregan información en un determinado punto. El hecho de realizar este estudio abre las puertas a poder complementar esta falta de información. Conociendo las ecuaciones que modelan el comportamiento de este fenómeno podemos buscar una aproximación a la realidad o dicho de otra forma, a la información que poseemos.

Para llevar a cabo este estudio numérico requerimos, en primer lugar, realizar un cuidadoso estudio de las herramientas numéricas que se usarán, sus limitaciones, dentro de que parámetros pueden ser usadas y los problemas que estas presentan. Este trabajo va enfocado a realizar precisamente un estudio del impacto de las resoluciones en la grilla, batimetría y línea de costa en la simulación de filamentos de surgencia costera a través de modelos numéricos. En adición será parte de una investigación que representará el fenómeno de filamentos de surgencia costera en la costa centro-norte de Chile utilizando modelación numérica. Esta última investigación está dentro de los proyectos FONDECYT [Sepúlveda, 2008].

1.1. Descripción del Proceso de Surgencia

Para la descripción de los filamentos de surgencia, que se realizará en la metodología, vamos a revisar el transporte de Ekman.

1.1.1. Transporte de Ekman

En vista de que el transporte de Ekman es el fenómeno que origina la surgencia en su mayoría en las costas es necesario poder entenderlo, para ello realizaremos un estudio de las ecuaciones que lo describen. Cushman-Roisin en el capítulo ocho de su libro desarrolla el tema La Capa de Ekman [Cushman-Roisin and Beckers, 2009], el cual hemos tomado como referencia para el desarrollo del estudio.

Para comenzar hemos de mencionar el hecho de que Vagn Walfrid Ekman se percató que la rotación de la tierra estaba relacionada con que el movimiento de los hielos en el ártico no siguiera las corrientes de viento (fenómeno observado por Fridtjof Nansen). Considerando las ecuaciones de movimiento del flujo en un entorno bajo rotación logro modelar y darle una explicación

a este fenómeno observado. Estas ecuaciones mostraron que existía una capa superficial (hoy llamada la capa de Ekman) que en el hemisferio norte se desviaba hacia la derecha siguiendo el sentido de los vientos y hacia la izquierda en el hemisferio sur, agregando que el flujo promedio que se producía en esta capa superficial que estaba bajo la influencia del viento, tenía un ángulo de 90 grados con respecto al sentido del viento. Es decir, si estamos en el hemisferio sur y tenemos un viento que se desplaza desde el Sur al Norte friccionando la superficie oceánica, habrá un transporte neto dentro de la capa de Ekman que se desplazara desde el Este hacia el Oeste. Hemos de mencionar también que así como el viento fricciona la superficie, el fondo del océano fricciona el fluido en movimiento. Por lo anterior tenemos que el perfil de velocidad sobre la capa del fondo como para la capa superficial tienen una forma similar.

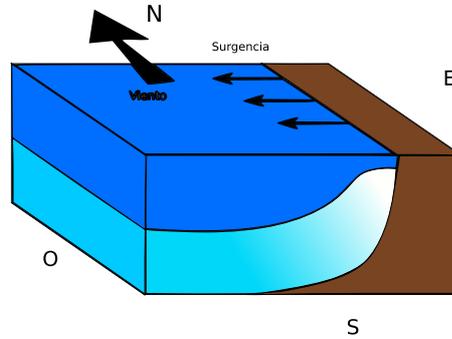


Figura 1.1: Esquema de la surgencia costera en el Hemisferio Sur

Para realizar la formulación de la capa de Ekman realizaremos ciertas suposiciones que nos lo harán más fácil. Supondremos un fluido con velocidades \bar{u} y \bar{v} , el cual presenta un estrés de viento en la superficie (τ^x, τ^y) . Además este fluido será estacionario, homogéneo y geostrófico en su interior. Por lo anterior podemos tomar la ecuación de momentum (ecuación D.7) y plantear las siguientes ecuaciones

$$\begin{aligned} -f(v - \bar{v}) &= \nu_E \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ f(u - \bar{u}) &= \nu_E \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \\ (z = 0) \quad \rho_0 \nu_E \frac{\partial u}{\partial z} &= \tau^x \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_0 \nu E \frac{\partial v}{\partial z} &= \tau^y \\ (z = -\infty) \quad u &= \bar{u} \\ v &= \bar{v} \end{aligned}$$

Las ecuaciones anteriores mas las condiciones de borde nos llevan a las soluciones siguientes

$$u = \bar{u} + \frac{\sqrt{2}}{\rho_0 f d} e^{z/d} \left[\tau^x \cos \frac{z}{d} - \frac{\pi}{4} - \tau^y \sin \frac{z}{d} - \frac{\pi}{4} \right] \quad (1.1)$$

$$v = \bar{v} + \frac{\sqrt{2}}{\rho_0 f d} e^{z/d} \left[\tau^x \sin \frac{z}{d} - \frac{\pi}{4} + \tau^y \cos \frac{z}{d} - \frac{\pi}{4} \right] \quad (1.2)$$

En la figura 1.2 puede apreciarse como estas ecuaciones nos muestran el efecto de la rotación terrestre sobre las velocidades en una corriente.

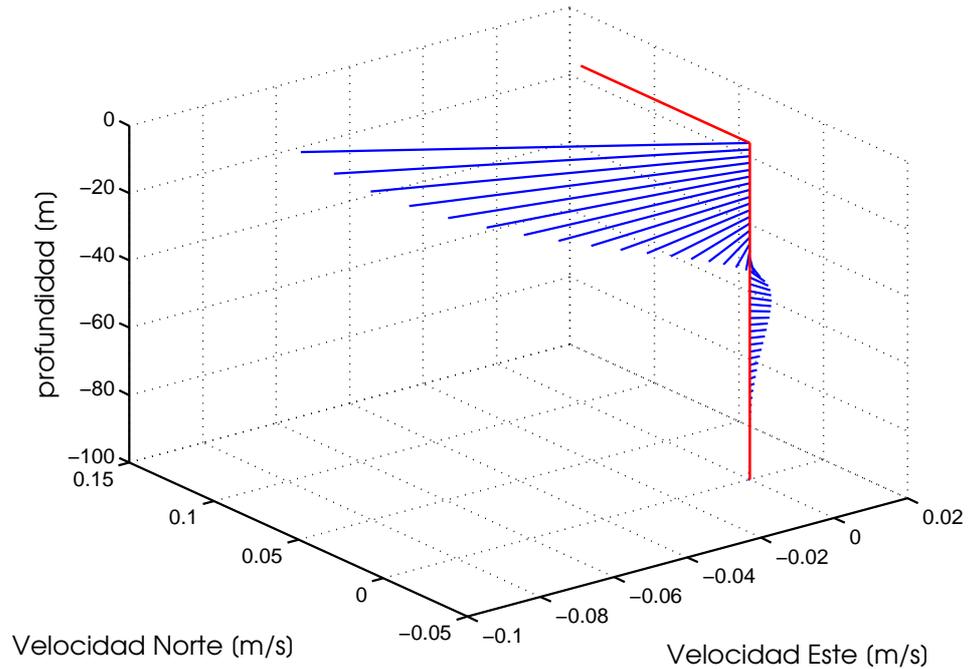


Figura 1.2: Espiral de Ekman, donde puede apreciarse como el ángulo de la velocidad va cambiando con la profundidad según las ecuaciones 1.1 y 1.2

1.2. Descripción de la Región

El Pacífico Sur Occidental (PSO) es la segunda región mas productiva a nivel mundial, siguiendo al pacifico norte oriental ubicado en el primer lugar. Perú y Chile ubicados en el PSO, son parte de los 10 principales productores en la pesca de captura marina y continental. En primer lugar se encuentra China (con 17.1 millones de toneladas en el año 2006), sin embargo hemos de notar que las producciones peruana y chilena juntas fueron un poco menor que la producción china en el año 2004, con 2.4 millones de toneladas de diferencia [Fisheries and Aquaculture Department, 2006] y una diferencia de 5.9 en el año 2006 asociada a una caída en la captura de la anchoveta [Fisheries and Aquaculture Department, 2008].

El estudio e investigación de esta región (PSO) nos ha provisto de una rica información sobre los distintos fenómenos presentes y el porqué de algunos de ellos. Estos fenómenos no solo están relacionados con el océano, también existen fenómenos atmosféricos que juegan un papel fundamental en algunos comportamientos presentes en el océano, en especial sobre las regiones costeras.

De los fenómenos atmosféricos hemos de mencionar la Zona de Convergencia Intertropical. Esta es una zona de baja presión donde convergen vientos provenientes el norte y sur. Las masas de aires transportadas a esta zona comienzan a ascender para dar lugar a aquellas que están desplazándose a esta zona. Esta ascensión genera una condensación del vapor de agua presente en el aire ocasionando una particular nubosidad y periodos con gran precipitación en la zona ecuatorial, entre los 2° y 12° N.

El ciclón subtropical es un centro de alta presión que presenta una oscilación estacional, es decir, que durante verano su centro puede ser ubicado en torno de los 32° latitud sur y en invierno en torno de los 27° latitud sur. Este centro de alta presión genera un desplazamiento de masas de aire hacia el ecuador, y con ello la costa norte-centro de Chile se ve expuesta a vientos que se dirigen al norte. Estos últimos tienen un impacto en las corrientes superficiales presentes en esta región y en los fenómenos de surgencia costera entre otros [Batteen et al., 1995].

La región oceánica del PSO, así como toda la naturaleza, muestra una gran dinámica. Podemos encontrar una gran variedad de corrientes presentes en esta región oceánica. Algunas están presentes todo el año mientras que otras solo se presentan en ciertas estaciones del año. Muchas de estas corrientes han sido relacionadas por las propiedades de las aguas, donde la salinidad y temperatura presentan valores muy similares. Específicamente frente a la costa chilena podemos encontrar la Corriente de Humboldt, que es la

rama que se dirige al norte de la corriente de Deriva del Oeste al encontrarse con al costa chilena. La otra rama que se dirige al sur recibe el nombre de la corriente del Cabo de Hornos. Entre la corriente de Humboldt y la costa chilena podemos encontrar la Contra corriente Chile-Perú, la corriente subsuperficial de Gunther y la corriente chilena costera, donde esta ultima se presentaría en determinadas épocas del año. Estas tres últimas corrientes serían diferenciadas por las características de sus masas de agua [Strub et al., 1998].

En la costa norte-centro de Chile puede observarse el fenómeno de surgencia costera, la cual está relacionada con el transporte de Ekman. Los mecanismos necesarios para que esto se realice pueden ser distintos, como por ejemplo remolinos, convergencia de masa de agua, etc. Sin embargo, en su mayoría, la surgencia costera está asociada al transporte de Ekman que se presenta principalmente por el forzamiento que crea el viento en la superficie oceánica. Para que este transporte se haga efectivo, debemos cumplir con algunos requisitos asociados al hemisferio donde se encuentra la región en estudio, la dirección del viento y la línea de costa. Por ejemplo, para el caso de Chile que está en el hemisferio sur y su costa está mirando hacia el oeste, el viento que forzara la superficie para generar surgencia será el que se mueva desde el sur hacia el norte. El agua superficial será transportada hacia el interior del océano por la superficie y agua profunda surgirá para ocupar el espacio que dejó la primera.

La región costera de la zona centro-norte de Chile se ve expuesta a un viento que se mueve desde el sur al norte por las características atmosféricas ya mencionadas, por lo cual tenemos un ambiente propicio para que el transporte de Ekman haga presente el fenómeno de surgencia en esta región. Como las características de las aguas provenientes del fondo oceánico son más aptas para el desarrollo de los pelágicos, el fenómeno de surgencia costera aumentará la productividad en la región donde se presente. De esto último surge el interés, principalmente de los privados, de poder entender y conocer las características de la surgencia costera.

Capítulo 2

Método

Para esta tesis se utilizarán los resultados que se obtengan de las simulaciones realizadas con ROMS AGRIF, a los cuales se les aplicarán distintas herramientas y criterios para su análisis. Las configuraciones a utilizar en el modelo numérico como las herramientas y criterios a utilizar en el análisis de los resultados se describirán a continuación.

Para estas simulaciones se utilizará el modelo numérico ROMS AGRIF, que se ha seleccionado por su alta facilidad para ser configurado con las herramientas ROMSTOOLS, las cuales han sido escritas en su mayoría en Matlab para todo el proceso previo al procesamiento, compilación, simulación y post procesamiento. Las principales características del modelo y sus herramientas pueden verse en el Apéndice A.

Los primeros pasos serán realizar dos simulaciones con una diferencia en el paso espacial, para ello se utilizarán las bases de datos disponibles en las herramientas ROMSTOOLS. Los resultados obtenidos se dividirán en secciones en la latitud y se procederá a contar el número de filamentos que presentó cada una de estas secciones por mes. Este conteo se realizará por un periodo de cuatro o cinco años, esto dependerá de la cantidad de años que se logre simular. Una vez terminado este análisis se determinarán las regiones con el número mayor de filamentos durante el año, las estaciones del año y meses que presentan el mayor número.

Para realizar el conteo de filamentos se seguirán los siguientes parámetros: Primero, el gradiente de temperatura del filamento con respecto al agua que lo rodea, pero no esta en la corriente que lo forma, deberá ser igual o sobre los 2 grados Celsius. Segundo, el largo del filamento deberá ser mayor que tres veces el ancho de la base que lo sostiene. Tercero, que este se presente por un mínimo de tres días. Un resumen de estos criterios puede encontrarse

Tabla 2.1: Descripción del Computador utilizado

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	8MB
L3 Cache Speed	2.26 GHz
Memoria Física	8 GB (4 módulos de 2GB DDR3, 1066MHz)
Memoria Swap	2GB
Discos Duros	4 HD SAS 450 GB, 15000 RPM

en la tabla 2.3. El conteo y este criterio serán aplicados por el investigador directamente, es decir, éste decidirá al observar el gráfico de temperatura con los campos de velocidades, si una posible formación de un filamento cumple con los parámetros anteriormente descritos como para ser contado.

Con los resultados de estas dos simulaciones se realizará un pequeño estudio de las estructuras de los filamentos, para ello en las regiones con mayor número de filamentos se seleccionarán uno o dos procesos para determinar su ancho, profundidad, largo, inclinación, velocidad de transporte, distancia de la fuente a la costa y gradiente de temperatura con el océano interior. La selección de los filamentos buscará encontrar aquellos con las mayores dimensiones en su largo y velocidades de transporte.

Estos últimos resultados podrán ser comparados con mediciones realizadas en la zona ([Sobarzo and Figueroa, 2001] y [Grob et al., 2003]). Los resultados de esta comparación se esperarán dentro del mismo orden. No se espera una similaridad mayor ya que los forzantes son promedios mensuales de varios años. En el caso de [Sobarzo and Figueroa, 2001] la ubicación geográfica del filamento estudiado se encuentra en la parte exterior del límite

Tabla 2.3: Criterios para definir un filamento

Gradiente de Temperatura	$\geq 2^{\circ}C$
Ancho de Base / Largo	$\leq 1/3$
Duración	≥ 3 días
Largo	≥ 100 km
Ancho	≥ 10 km

sur de la región simulada.

El siguiente paso es realizar simulaciones variando la resolución en

- Batimetría
- Línea de Costa
- Grilla

Las dos simulaciones de un principio estarán dentro de las variaciones de la grilla. De estas dos grillas se medirá el tiempo requerido para realizar un año de simulación más el tiempo que les toma en alcanzar el equilibrio en la energía cinética total del modelo. Con estas mediciones se decidirán las resoluciones de las nuevas tres simulaciones a las cuales se les realizará las mismas mediciones. Estos resultados serán necesarios para manejar y administrar el tiempo que se invertirá en las simulaciones como en la administración de recursos computacionales.

Las variaciones en la línea de costa serán utilizadas por ROMSTOOLS a la hora de determinar qué elementos deben corresponder a agua-tierra para crear la máscara. Para que sea útil una línea de costa de alta resolución la grilla donde se utiliza debe ser de una resolución similar de lo contrario no se verán grandes cambios en la máscara que se genera, por ello se utilizará la grilla que ofrezca la mayor resolución dentro de un tiempo razonable de simulación.

Con respecto a la batimetría, se buscará utilizar la base de datos ETOPO [Smith and Sandwell, 1997], que trae ROMSTOOLS, y se realizará una búsqueda de nuevas bases de datos para ser utilizadas en esta variable. De la misma forma, estos cambios serán utilizados con una grilla que tenga una resolución mayor que la base de datos que posea la mayor resolución, esto último sujeto nuevamente al tiempo necesario para realizar las simulaciones.

Adicionalmente, se realizarán estudios de correlación para los distintos cambios, mencionando aquellos que presenten áreas de correlación negativa o que no tengan correlación. Se menciona lo anterior, ya que las simulaciones son todas con forzamientos iguales y en el mismo lugar, lo cual nos lleva a esperar correlaciones altamente positivas. Esta correlación se realizará tanto para el plano superficial como para el plano vertical. En los primeros pasos se habrá seleccionado los filamentos a ser estudiados. A estos también se les aplicará una herramienta de correlación para ver cuáles son las áreas que sufren los mayores impactos con los cambios de resolución.

2.1. Configuraciones y Características Utilizadas de ROMS

2.1.1. Grilla

El ancho de los filamentos está entre las decenas de kilómetros (30 - 90 km) según la literatura. Esta características nos obliga a trabajar con una resolución suficiente como para resolver el ancho. Para poder estudiar el ancho del filamento y su dinámica bajo la superficie, creemos que es necesario tener al menos tres o cuatro puntos. Si trabajamos con una grilla que tenga un punto cada 10 kilómetros, tendremos suficientes puntos para resolver filamentos de grandes dimensiones (ancho > 50 km). Pero para resolver filamentos más pequeños necesitamos una grilla más fina, por ello se utilizará una con un punto cada 5 kilómetros aproximadamente.

Ya que es necesario trabajar con grillas de tan alta resolución en un gran espacio, delimitado en la tabla 2.4 , surge el problema del tiempo de cálculo. En vista de que esta investigación esta limitada a un año, es necesario poder acelerar el cálculo. Para cumplir con los plazos el modelo será implementado y utilizado en forma paralela en uno de los computadores del Proyecto Conicyt 11080245 [Sepúlveda, 2008], el cual posee las características descritas en la tabla 2.1. El objetivo del cálculo paralelo es realizar las simulaciones a través de varios procesos en distintos CPUs y con ello realizar las simulaciones en un tiempo menor, en nuestro caso podremos utilizar hasta 8 cores. Para este tipo de trabajo el código del modelo numérico posee dos opciones, OpenMP (Open Multi-Processing) o MPI ((Message Passing Interface), de las cuales utilizaremos MPI. La descripción de esta última puede verse en el Apéndice C.

Tabla 2.4: Configuraciones Generales de las Simulaciones

Ancho de Capa Esponja [m]	1e5
Latitud Máxima	-15.0
Latitud Mínima	-35.0
Longitud Máxima	-69.0
Longitud Mínima	-80.0
Capas Sigma	32
theta_s	6.0
thata_b	0.0

Capas Sigma

Se utilizarán 32 capas sigmas para poder tener suficiente resolución en profundidad. Ya que, los filamentos son fenómenos superficiales (dentro de los primeros 100 metros), nos conviene que la distribución de las capas sigma tenga un número mayor cerca de la superficie. Para tener esta característica modificamos los coeficientes θ_s y θ_b con los valores expresados en la tabla 2.4 Si utilizamos la configuración anterior en un valle de 1000 metros de profundidad, 18 capas estarán dentro de los primeros 100 metros de profundidad. Esto nos da un punto en profundidad cada 5 o 6 metros, permitiéndonos resolver en profundidad la dinámica de un filamento.

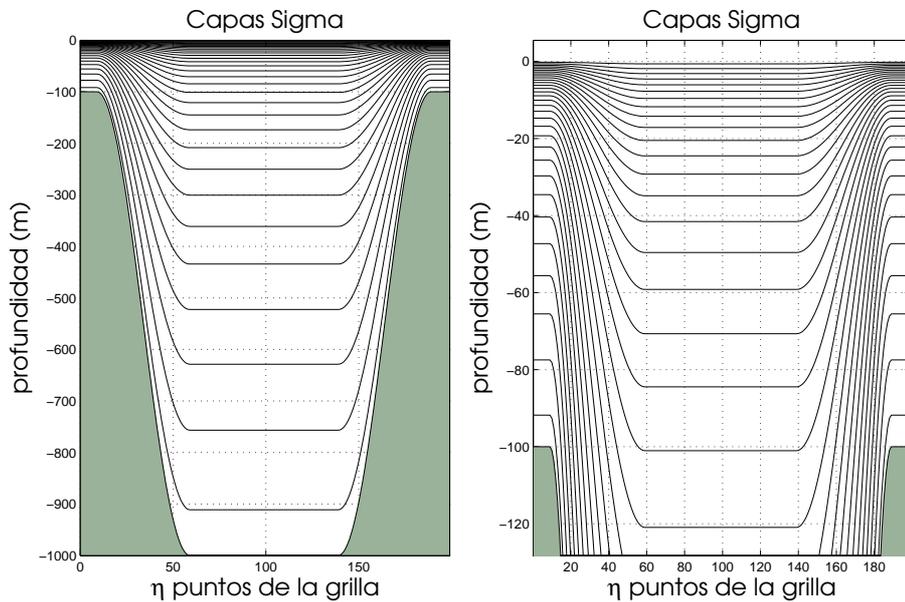


Figura 2.1: Distribución de las Capas Sigma. La configuración para esta distribución es de 32 capas sigmas, $\theta_s = 6.0$ y $\theta_b = 0.0$. La figura de la derecha es un acercamiento de la superficie.

2.1.2. Condiciones Iniciales

Para poder iniciar los cálculos debemos presentar una condición inicial para todas las variables a estudiar, vale decir, el campo de velocidades, temperatura, salinidad y nivel del mar. Estas condiciones iniciales serán inter-

poladas de la base de datos disponibles en ROMSTOOLS, específicamente del promedio mensual del World Ocean Atlas (WOA) 2005 [Conkright et al., 2002]. Los datos a interpolar pueden observarse en la figura 2.2 los cuales corresponden a la temperatura y salinidad con una resolución de medio grado.

Para el caso del campo de velocidades y el nivel del mar no se interpolará una condición inicial, sino que se partirá de una condición estacionaria y con el avance de los cálculos irán adquiriendo una dinámica.

2.1.3. Condiciones de Borde Superficial

La capa superficial del océano está sujeta al efecto de fenómenos atmosféricos. Estas condiciones de borde superficial serán obtenida de The Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set 2005 (COADS) [Silva et al., 1994]. Estos son promedios mensuales correspondientes al periodo 1945-1989 con una resolución de medio grado.

En la figura 2.3 puede observarse el estrés de viento para el primer y séptimo mes del año. Puede apreciarse que tanto a inicios y a mediados de año el viento presenta un sentido de sur a norte frente a la costa norte de Chile. Como se vio en un inicio este será uno de los factores primordiales al momento de presentar el fenómeno de surgencia en la costa. Estas no son las únicas variables consideradas en el borde superficial. También pueden encontrarse el flujo de agua fresca, correspondiente a la diferencia entre la evaporación y precipitación [cm/da] y radiación solar de onda corta [W/m^2].

Con estos datos se genera el archivo `roms_frc.nc` a través de una interpolación, con los forzantes o condiciones superficiales para el modelo. Como los datos son promedios mensuales, el modelo realizará una interpolación lineal para completar la información que es necesaria entre los dos meses.

2.1.4. Condiciones de Borde Laterales.

Principalmente esta sección esta basada en el trabajo de Patrick Marchesiello ([Marchesiello et al., 2001]), donde describe el método utilizado para afrontar la información que sale y entra al modelo a través de los bordes abiertos.

El método está dentro de los métodos radiativos, que se basan en la ecuación de radiación de Sommerfeld [Sommerfeld, 1949] para la extrapolación de una solución interior. El punto base de este método es el tener una formulación apropiada para la velocidad de fase de la onda. Orlanski propuso [Orlanski, 1976] una forma de estimar la velocidad de fase utilizando

2.1. CONFIGURACIONES Y CARACTERÍSTICAS UTILIZADAS DE ROMS13

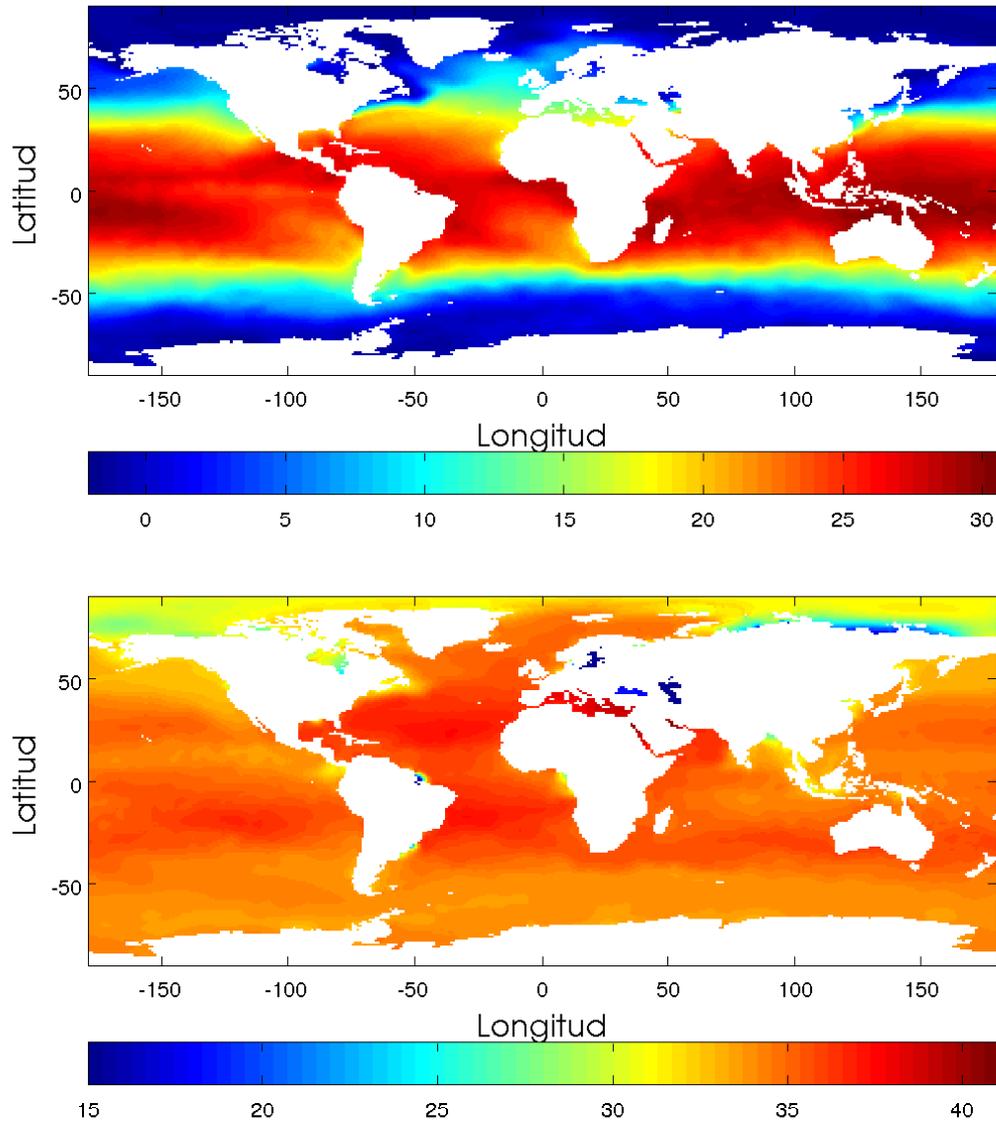


Figura 2.2: Temperatura (arriba) y Salinidad (abajo) para el promedio mensual de enero del WOA 2005 en grados Celsius y psu respectivamente.

valores interiores. Una vez que la velocidad de fase es estimada, los flujos

que entran y salen pueden ser tratados de forma separada.

Una vez que determinamos un borde pasivo (propagación hacia el exterior) la extrapolación de radiación es aplicada, lo cual permite que la información de la solución interior pueda pasar a través del borde con una reflexión muy pequeña. Para el caso de un borde activo (propagación hacia el interior) como las ecuaciones requieren de información exterior, la solución puede ser llevada muy cerca de la información exterior.

Considerando la radiación con velocidad de fase compuesta por una parte normal y una tangencial al borde, Raymond y Kuo plantearon [Raymond and Kuo, 1984] utilizar la siguiente forma de la ecuación de Sommerfeld para derivar la condición de radiación,

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{c} \frac{\partial \phi}{\partial n_r} = 0 \quad (2.1)$$

donde \mathbf{c} posee una parte normal (x) y una parte tangencial (y) a los bordes. Las componentes (c_x , c_y) de la velocidad de fase son proyecciones de la radiación, las cuales son estimadas del campo ϕ que rodea el punto en el borde de la forma

$$c_x = -\frac{\partial \phi}{\partial t} \frac{\partial \phi / \partial x}{(\partial \phi / \partial x)^2 + (\partial \phi / \partial y)^2} \quad (2.2)$$

$$c_y = -\frac{\partial \phi}{\partial t} \frac{\partial \phi / \partial y}{(\partial \phi / \partial x)^2 + (\partial \phi / \partial y)^2} \quad (2.3)$$

Esta idea fue desarrollada por Orlanski pero solo para radiación perpendicular al borde. El nuevo planteamiento de Raymond y Kuo nos permite aplicar este método para toda radiación, incluyendo aquella que se aproxima de manera oblicua al borde. Aunque el desarrollo está generalizado para n dimensiones, para el modelo no se utilizarán tres, sino dos dimensiones x - y .

Capa Esponja

El modelo aparte de las condiciones de borde anteriormente comentadas, posee una región frente a los bordes abiertos configurable para disipar energía. Para esto se debe indicar una distancia en metros que, partiendo desde el borde de la grilla, nos definirá un segundo “borde”, el cual al ser traspasado procederá a disipar energía. El ancho de la capa esponja para las simulaciones será de 100 kilómetros (`x_sponge`) para todas las simulaciones, lo cual corresponde a un grado aproximadamente en latitud o longitud para esta región. El coeficiente de disipación será utilizado con un valor de $800 \text{ m}^2/\text{s}$ (`v_sponge`)

Tabla 2.5: Caracteres utilizados en el código de cada simulación

Caracter 1 y 2	Caracter 3 y 4	Caracter 5 y 6
Grilla	Línea Costera	Batimetría ¹
10	OR	CU
20	DE	LI
	SU	

Para evitar que esta esponja afecte la información que está entrando en la región, creemos que se utiliza el mismo método antes descrito. Esto significaría que la información que viaja perpendicular al borde y hacia fuera de la región solamente sería afectada por esta disipación.

2.2. Clasificación de las Simulaciones

Cada simulación tendrá un código de seis caracteres donde los dos primeros corresponderán a la grilla utilizada, los siguientes dos a la a la línea de costa utilizada y los dos últimos a la interpolación de batimetría utilizada.

Tendremos dos tipos de grillas la primera de 1/10 de grado tanto en latitud como longitud, y la segunda de 1/20 de grado. La primera será identificada con el número 10 y la segunda con el número 20 dentro del código. Para la línea de costa se utilizará primero la máscara directamente obtenida de ROMSTOOLS (OR), luego una máscara con la línea de costa editada para tener una mayor descripción de los detalles (DE) y por último una máscara con la línea de costa editada, haciéndola más suave y con pocos detalles (SU). Finalmente para la batimetría se utilizarán dos tipos distintos de interpolación: una lineal y otra cúbica. La primera se le identificará por los caracteres LI y la segunda con los caracteres CU¹. La tabla 2.2 muestra un resumen de los caracteres a utilizar.

¹Esta parte sufrió modificaciones por problemas inesperados al utilizar los distintos tipos de interpolación. Ver sección 3.1.2

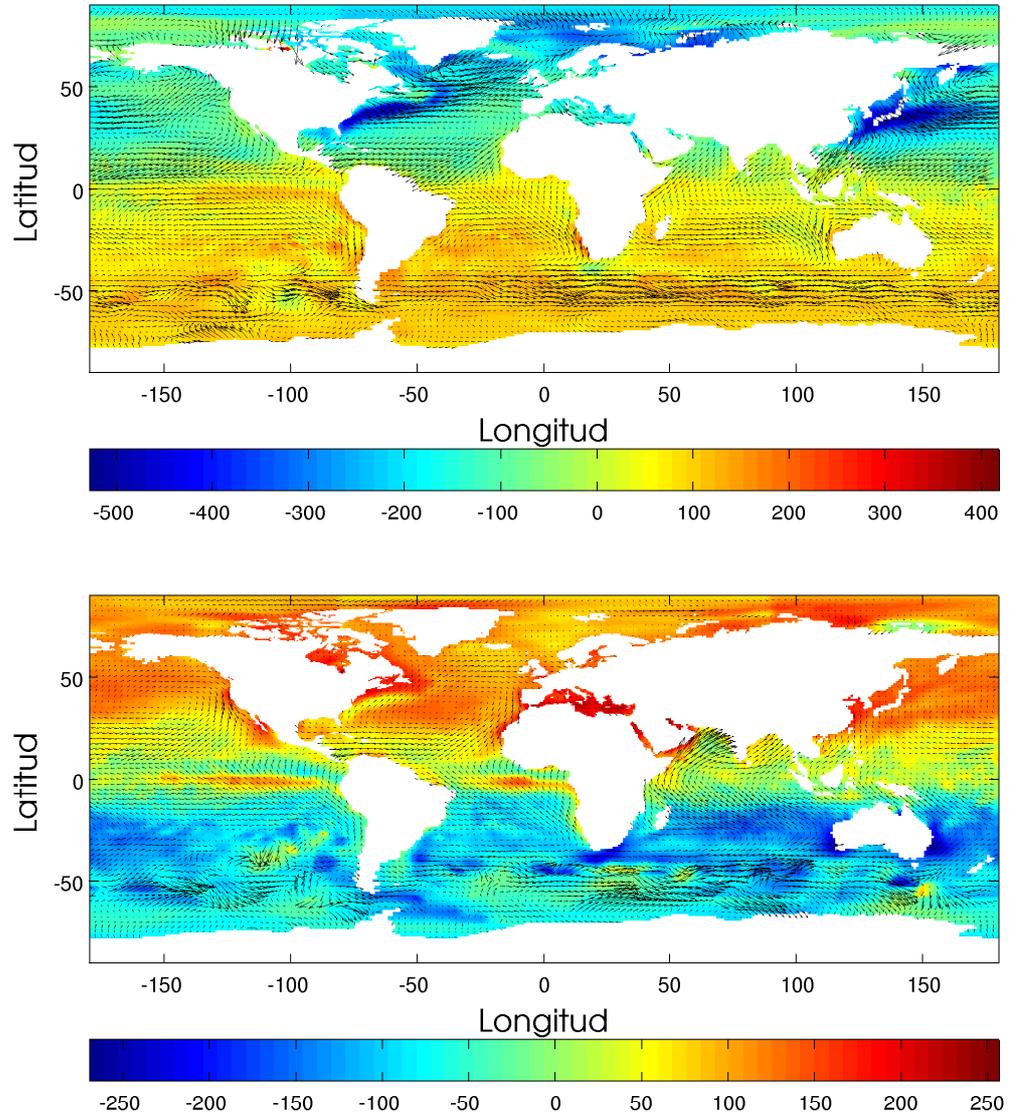


Figura 2.3: Campo de estrés de viento [N/m^2] para la superficie del océano junto con la transferencia de calor neto [W/m^2] para el primer mes (arriba) y el séptimo mes (abajo) del COADS. Los vectores del campo de estrés viento están representado por las flechas, mientras que la transferencia de calor neto está representado por lo colores.

Capítulo 3

Resultados

A continuación se verán los resultados de las simulaciones, como por ejemplo: las variaciones de energía cinética, temperatura y salinidad, conteo de filamentos y dimensiones, transporte y velocidad de algunos de ellos, la eficiencia de utilizar MPI o OpenMP.

3.1. Condiciones Modificadas

3.1.1. Resolución

Se realizaron los cálculos sobre dos grillas de resoluciones de $1/20$ y $1/10$ de grado. En vista de que la bibliografía les asigna a los filamentos anchos de decenas de kilómetros, debíamos ser capaces de resolver esta distancia en los cálculos. Por ello la grilla de $1/10$ de grado tiene un punto cada 10 kilómetros y la de $1/20$ de grado tiene un punto cada 5 kilómetros aproximadamente. Y aunque realizar cálculos con estas resoluciones requiere bastante tiempo, no es recomendable utilizar resoluciones que contengan menos de un punto cada 10 kilómetros, ya que simplemente puede no resolverse este fenómeno costero por las dimensiones de este.

3.1.2. Batimetría

Para la batimetría se tenían cuatro opciones de interpolación. De estas se seleccionó la interpolación cúbica, lineal y del punto más cercano. Sin embargo, para las simulaciones sólo se utilizaron la cúbica y la del punto más cercano, ya que presentaban las mayores diferencias (figura 3.1).

La diferencia en la batimetría es más evidente en la grilla de 5 km que la grilla de 10 km de resolución. En esta última grilla el rango de diferencia

entre la interpolación cúbica y el punto más cercano continúa siendo más grande. Pero en general las diferencias de la interpolación lineal y del punto más cercano con respecto a la cúbica, se presentan en las mismas regiones, en especial en la cuenca. La forma de la cuenca está mejor descrita por la interpolación lineal, ya que en la del punto más cercano se observan cortes en esta. Estos cortes en la cuenca también pueden verse para el caso de la grilla de 5 km de resolución en el gráfico de la derecha en la figura 3.1.

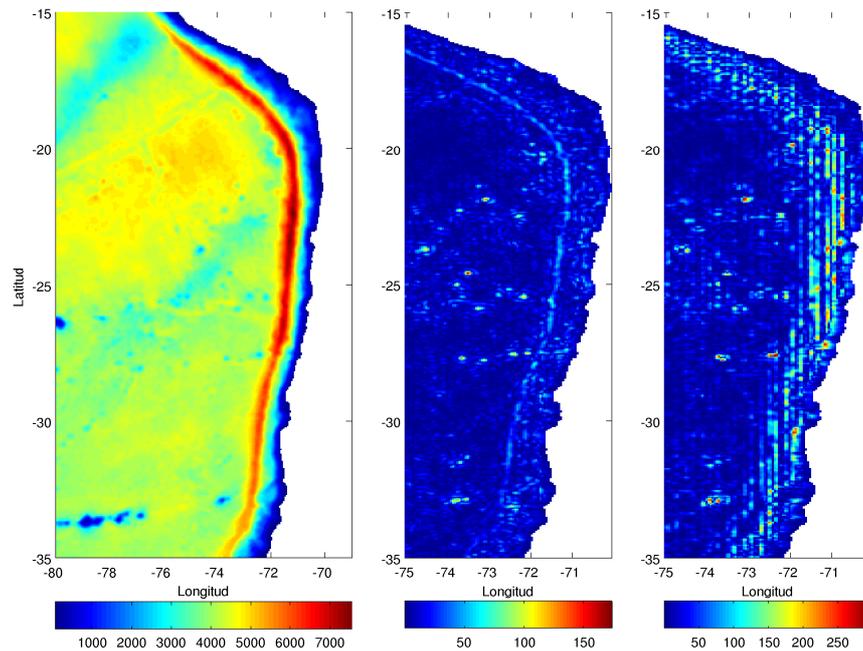


Figura 3.1: Gráficos de izquierda a derecha. Batimetría para la grilla de 5 km de resolución utilizando interpolación cúbica. La diferencia en la batimetría generada por una interpolación cúbica y una lineal. La diferencia entre la interpolación cúbica y del punto más cercano. La unidad utilizada para todos los gráficos anteriores fue el metro.

Con todo, las interpolaciones distintas a la cúbica llevaron al modelo a explotar, tanto si iniciábamos la simulación desde el mes 11 del año 7 o si realizábamos la simulación desde un inicio (mes uno del año uno).

En vista de lo anterior, se utilizó una base de datos del Centro de Datos Oceanográficos Británico llamada GEBCO (General Bathymetric Chart of Ocean). Los datos para la región en estudio pueden verse en la figura ?? con

una alta resolución (30 segundos de grado) para este estudio en particular. Para esta base de datos se presentó el mismo problema anterior, la interpolación del punto más cercano produjeron que los cálculos en la simulación convergieran a resultados no permitidos (la simulación explota o se rebasa).

Finalmente se logró utilizar la fuente de datos GEBCO en las simulaciones a partir del mes 11 del año 7, realizando el suavizado de la batimetría interpolada dos veces. Esta última modificación se realizó en el código de ROMSTOOLS, específicamente en el archivo `make_grid.m`. En adición a lo anterior se copió la batimetría resultante al archivo netcdf original que contiene la grilla, esto para evitar problemas con la máscara. Las diferencias entre la batimetría interpolada desde ETOPO (figura 3.1) y GEBCO, puede verse en el segundo gráfico de la de la figura 3.2.

Observando la figura 3.2 puede verse que la base de datos ETOPO posee una batimetría costera en el norte de Chile mas profunda que GEBCO, presentando diferencia alrededor de los 500 y 600 metros de profundidad. La cuenca presenta diferencias entre los 200 y 300 metros donde GEBCO posee mayores profundidades. Desde la cuenca al interior del océano las diferencias se muestran entre los 100 y 250 metros, con mayor profundidad en la base de datos GEBCO, exceptuando las islas y montañas submarinas presentes.

3.1.3. Línea de Costa

En el caso de la línea de costa, se modificó la máscara que definía las celdas cero/uno (tierra/agua). Para esta máscara se utilizó la línea de costa como referencia para agregarle detalles a la máscara que originalmente había sido creada por ROMSTOOLS. Para obtener la tercera línea de costa se procedió a suavizarla, es decir, manualmente se modificó la máscara, haciendo desaparecer bahías o salidas de tierra, dejándola con suaves curvas. Este procedimiento se aplicó sobre las grillas de 5 km y 10 km de resolución, lo cual generó tres diferentes líneas de costa por grilla: la línea de costa original, detallada y suavizada. Los resultados de estas líneas de costa pueden observarse en la figura 3.3.

3.2. Simulaciones

3.2.1. Resultados del Cálculo Paralelo

Como este trabajo de investigación es la base para la toma de decisiones del trabajo de simulación en el proyecto llevado a cabo por el Dr. Andrés Sepúlveda, se ha realizado un pequeño estudio del tiempo necesario para

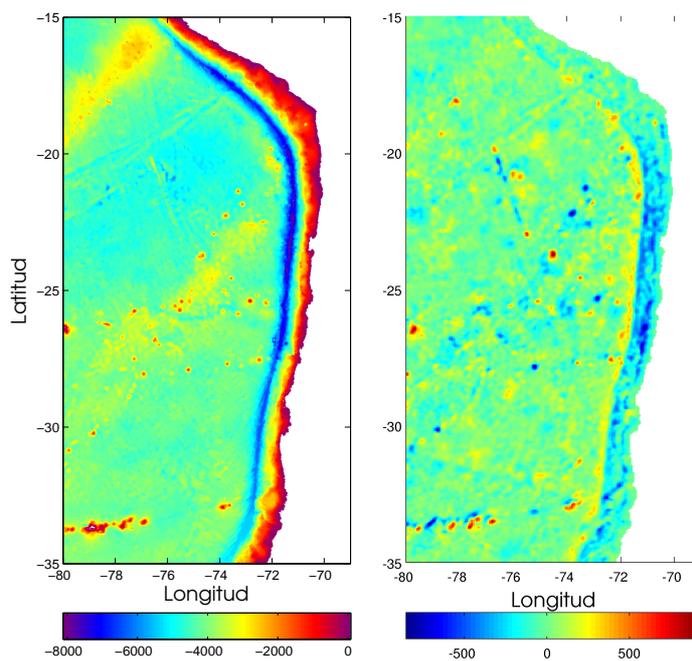


Figura 3.2: De izquierda a derecha. Gráfico de la batimetría en metros para la región en estudio en la base de datos GEBCO. Gráfico de la diferencia de las batimetría interpoladas de las bases de dato GEBCO y ETOPO

realizar las simulaciones utilizando las opciones MPI y OpenMP en ROMS. Primero nos referiremos a los resultados de trabajar con MPI y luego con OpenMP, la forma como estas interfases trabajan se ha intentado explicar en el Apéndice C.

Los resultados expuestos fueron obtenidos trabajando en una sola máquina multicore, no en un cluster. Las descripciones de esta máquina fueron expuestas en la tabla 2.1. Para la interfase MPI puede observarse la figura 3.4, la ganancia en tiempo es bastante grande al aumentar el número de procesos. Pero esta ganancia no es lineal, de hecho puede verse que a medida que se aumenta el número de procesos, el tiempo tiende hacia un valor en torno a los 40 segundos, lo cual se acerca a una función de la forma e^{-1} . Lo anterior nos lleva a decir que para este tipo de procesadores el tiempo necesario para realizar el cálculo de 100 pasos de este modelo, deberá estar entre los 30 y 40 segundos, independiente del número de procesadores o cores disponibles.

Para este computador en particular, luego de los ocho procesos, la ganancia cae, para repetir una curva entre los 9 y 16 procesos donde hay una ganancia de tiempo al aumentar el número de procesos, pero no se logra superar la eficiencia de 8 procesos. Esta situación debe estar asociada a que los cores poseen Hyper Threading, pero esta última característica no trae grandes beneficios al utilizar la interfase MPI.

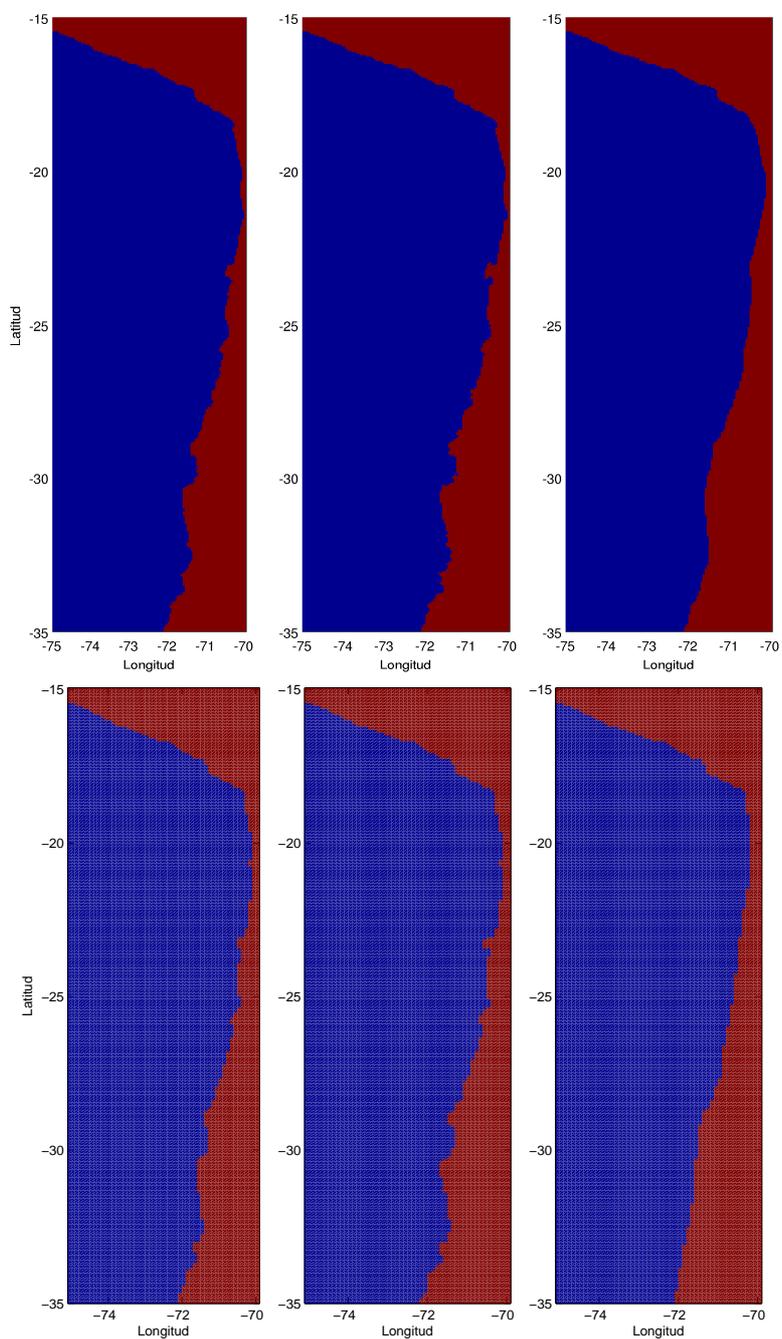


Figura 3.3: Gráficos de las distintas líneas de costas utilizadas para los cálculos de las grillas de 5 km (superior) y 10 km (inferior). De izquierda a derecha tenemos la línea de costa original, costa retocada con detalles y costa suavizada

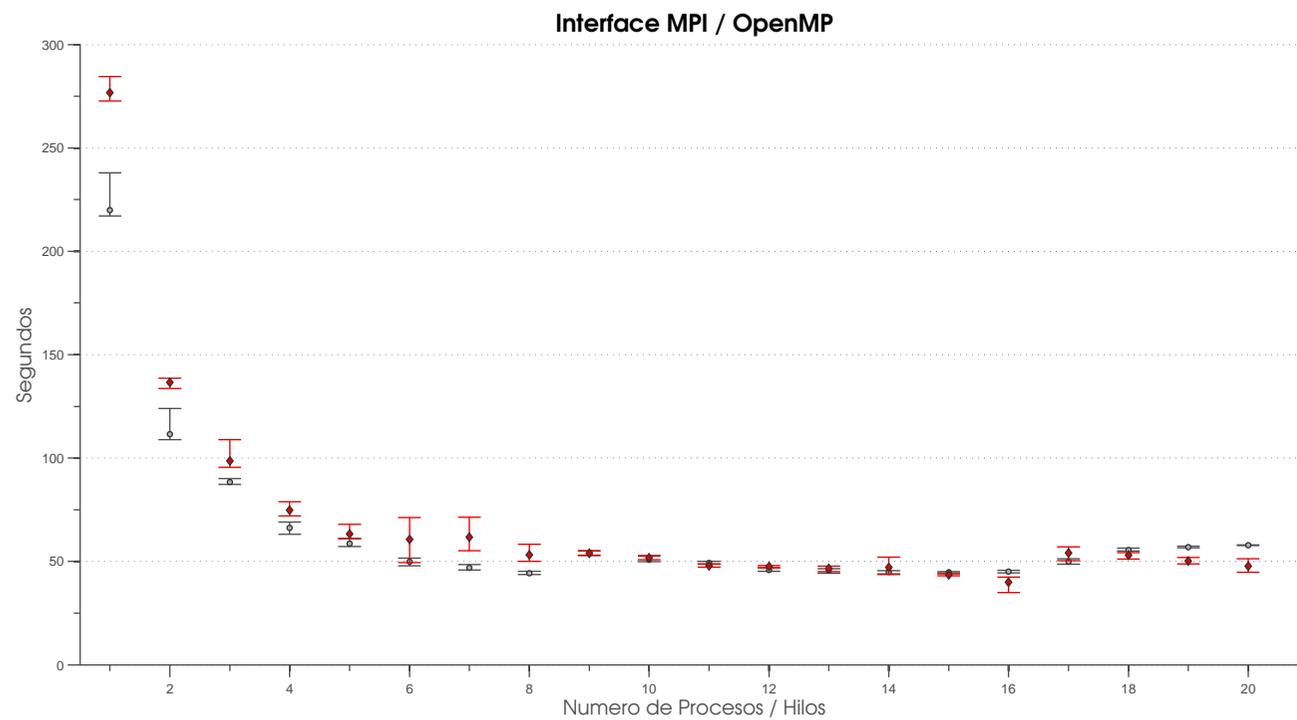


Figura 3.4: Tiempo necesario para realizar 100 pasos de simulación con distinto número de procesos para la interfase MPI (circulo) y distinto número de hilos para la interfase OpenMP (diamante)

Para la interfase OpenMP puede verse los datos en rojo de la figura 3.4 junto con la interfase MPI. Como OpenMP ha sido enfocado en memoria compartida, el cual es nuestro caso, se esperaron mejores resultados para esta interfase. Nuevamente la ganancia presenta una forma similar a la función e^{-1} entre 1 hilo y 8 hilos, pero con una eficiencia menor que MPI. Entre los 9 y 16 hilos la eficiencia continúa aumentando, sin embargo no de la misma forma que entre 1 hilo y 8 hilos. Esta eficiencia que se gana entre los 9 y 16 hilos logra alcanzar la eficiencia de 8 procesos de la interfase MPI y también superarla a momentos hasta por 10 segundos en el cálculo de 100 pasos.

Hemos de agregar que para la implementación de la interfase OpenMP fué necesario realizar algunos cambios en el código, que producían conflictos a lo hora de hacer funcionar la compilación del modelo. Este problema ha sido descrito en el Apéndice C.

Finalmente cabe mencionar que la ganancia con respecto a un cálculo serial es claramente apreciable. A su máximo rendimiento (8 procesos para MPI o 16 hilos para OpenMP) el cálculo numérico paralelo sólo requirió un 23 % del tiempo necesario para un cálculo serial. Es decir, que la simulación que requería una semana para realizar el cálculo ahora, con un cálculo paralelo se podría realizar en un día y medio aproximadamente. Las grillas de 5 km y 10 km requirieron 4 y 0.5 horas para realizar los cálculos para simular un mes. Si los cálculos anteriores se hubiesen hecho de forma serial, se hubiera requerido casi 3 meses y medio en la grilla de 5 km para simular los 12 años que se simularon en 24 días con la interfase MPI.

3.2.2. Clasificación y Resultados Generales

Esta sección pretende presentar las simulaciones realizadas junto con una descripción general y la clasificación utilizada para ellas.

En las columnas azules de la tabla 3.1 pueden observarse las simulaciones principales de este trabajo. Les hemos llamado Principales, porque calcularon 12 años partiendo de las condiciones iniciales interpoladas del WOA. Las simulaciones menores calcularon 10 meses, que se realizaron sobre las Principales partiendo del mes 11 del año 7.

Tabla 3.1: Características de las Simulaciones

	10.Original	10.Suavizada	10.Detallada	10.Original
Código	ETOPO	ETOPO	ETOPO	GEBCO
Paso Espacial (Grado)	1/10	1/10	1/10	1/10
Paso Temporal [s]	1200	1200	1200	1200
Dimensiones Matriz	109×222	109×222	109×222	109×222
Línea de Costa	Original	Suavizada	Detallada	Original
Batimetría	ETOPO	ETOPO	ETOPO	GEBCO
Tiempo Simulado	12 años	10 meses	10 meses	10 meses
	20.Original	20.Suavizada	20.Detallada	20.Original
Código	ETOPO	ETOPO	ETOPO	GEBCO
Paso Espacial (Grado)	1/20	1/20	1/20	1/20
Paso Temporal [s]	500	500	500	500
Dimensiones Matriz	219×444	219×444	219×444	219×444
Línea de Costa	Original	Suavizada	Detallada	Original
Batimetría	ETOPO	ETOPO	ETOPO	GEBCO
Tiempo Simulado	12 años	10 meses	10 meses	10 meses

3.2.3. Resultados de Estabilidad

Para estudiar la estabilidad del modelo, realizamos un análisis de la evolución de la energía cinética promedio, volumen, temperatura y salinidad. En la figura 3.5 pueden verse los resultados para la simulación **20.Original.ETOP0**.

Energía Cinética

Un criterio para decidir desde qué punto es recomendable utilizar los cálculos del modelo, es ver como evoluciona la energía cinética del modelo. Las condiciones iniciales nos entregan un modelo con cierta energía, pero una vez iniciada la simulación la energía cinética variará por los forzantes que presente el modelo como por la energía radiada dentro y fuera del modelo a través de los bordes abiertos.

El primer gráfico de la figura 3.5 muestra cómo el promedio de energía cinética varió durante los años de simulación. Durante el primer año ésta aumentó rápidamente para luego mantenerse en torno a los $21 \frac{cm^2}{s^2}$. Por ello los promedios (líneas rojas) fueron consideradas desde el segundo año simulado en adelante.

Volumen

Uno de los asuntos que llamó la atención al observar cómo evolucionaba el volumen de agua dentro del modelo, fue que éste aumentaba constantemente desde el segundo año en adelante (fig. 3.5, gráfico 2). Este aumento fue de unos 3 o 4 km^3 dentro de los siguientes once años luego que el modelo alcanzara un equilibrio en la energía cinética (primer año). Este aumento constante no era esperado, ya que significa que la cantidad de espacio utilizado por el océano aumenta constantemente. Esta variable debería alcanzar un equilibrio, el asunto sería determinar cuándo se alcanza. En adición hemos de mencionar que el aumento de volumen es despreciable con respecto al total de volumen que se trabaja dentro del modelo ($7,7 \times 10^{15} [km^3]$).

Temperatura y Salinidad

Tanto la temperatura como la salinidad presentan una oscilación anual bastante clara (fig 3.5 gráficos 3 y 4). Esta oscilación anual presenta su máximo a comienzos del año y su mínimo a fines de año tanto para la temperatura como la salinidad. La temperatura oscila en torno a un promedio de

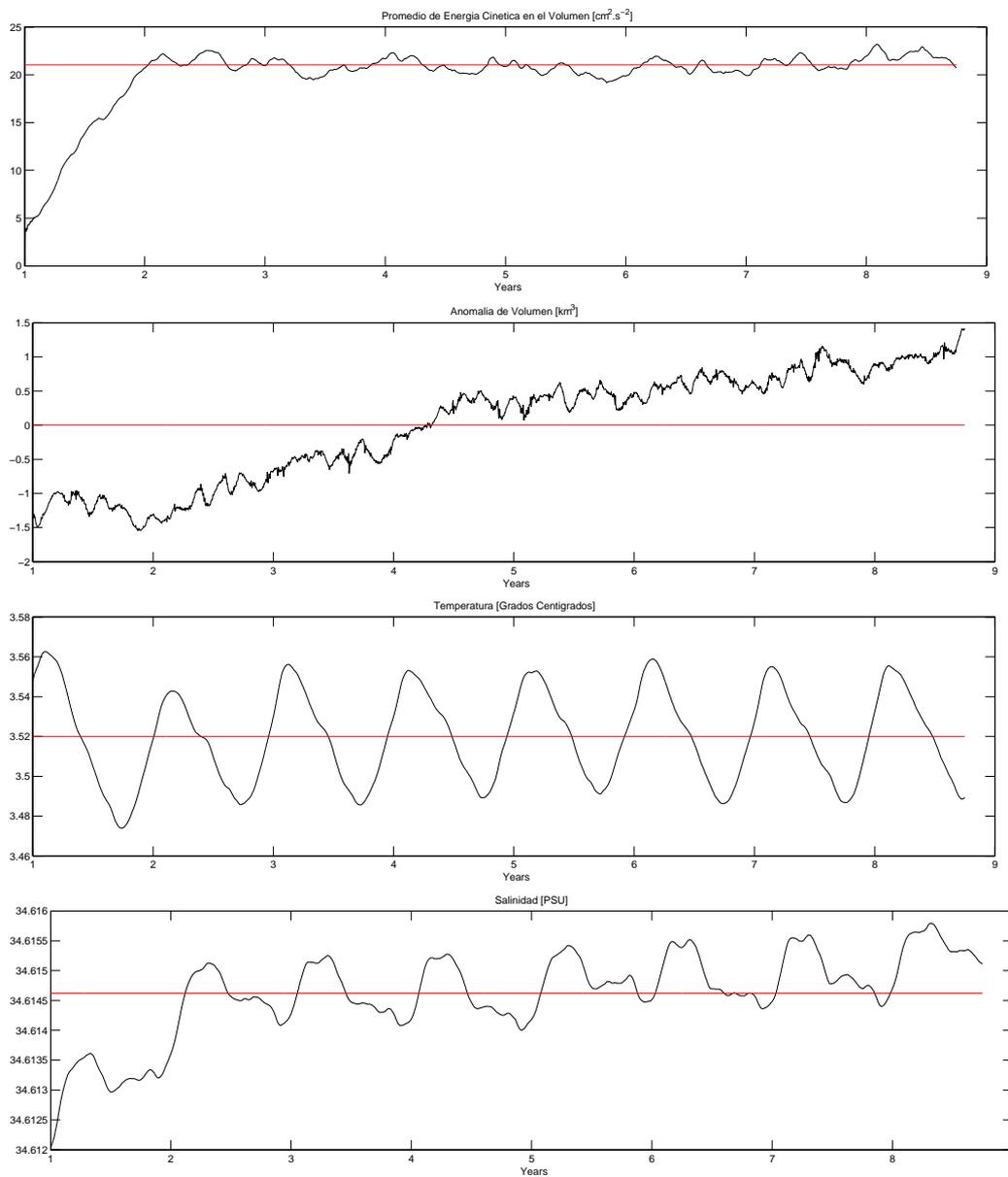


Figura 3.5: Gráficos de Estabilidad de la Simulación **20.Original.ETOP0**. La línea roja son el promedio partiendo desde el segundo año de simulación, ya que para este año la energía cinética alcanza la estabilidad.

3.52 grados celsius, mientras que la salinidad lo hace en torno a un promedio de 34.6146 psu.

De estos dos últimos gráficos hemos de resaltar que la salinidad presenta una tendencia a crecer durante toda la simulación de la misma forma que el volumen y dentro del mismo período. Este aumento se caracteriza por un fuerte crecimiento de la salinidad durante el primer año para pasar a un crecimiento mucho más suave, pero perceptible desde el segundo año en adelante.

3.3. Validación Preliminar de los Resultados

Para realizar la validación de los resultados obtenidos de los cálculos de ROMS se han descargados datos de temperatura superficial desde el NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Los datos obtenidos se referencian a OSTIA Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis, el cual es un sistema que reúne datos satelitales como datos in situ a través de una interpolación. Los datos poseen una resolución de $1/20^\circ$, lo cual es equivalente a unos 5 km.

3.3.1. Promedios Diarios de Temperatura Superficial

Para ver el comportamiento general de la temperatura superficial se ha generado un gráfico con el promedio diario de la superficie tanto para los datos obtenidos de OSTIA como los resultados del cálculos de la simulación. En la figura 3.3.1 pueden observarse ambos resultados. Rápidamente se puede ver que los resultados del cálculo presentan una forma sinusoidal sin grandes variaciones, lo cual puede estar relacionado con el hecho de que los forzantes utilizados son los mismos para cada año. Esto último significa que la radiación sobre la superficie varía de un mes a otro, pero se repite al comenzar un nuevo año.

Otra observación puede hacerse sobre los mínimos y máximos de las series de tiempo. Los mínimos son bastante cercanos, a pesar de que los cálculos no presentan grandes variaciones en comparación con los datos reales. Sin embargo, en el caso de los máximos pueden observarse diferencias en torno a los 3 grados durante toda la serie, lo cual involucra que los máximos no presentan una representación adecuada en los cálculos. Esto puede deberse a que la radiación utilizada no corresponde al periodo de tiempo de los datos reales sino a un promedio periodo anterior.

La fase como la frecuencia de ambas señales se observan similares, presentado los máximos momentos después de que el año ha iniciado y los mínimos

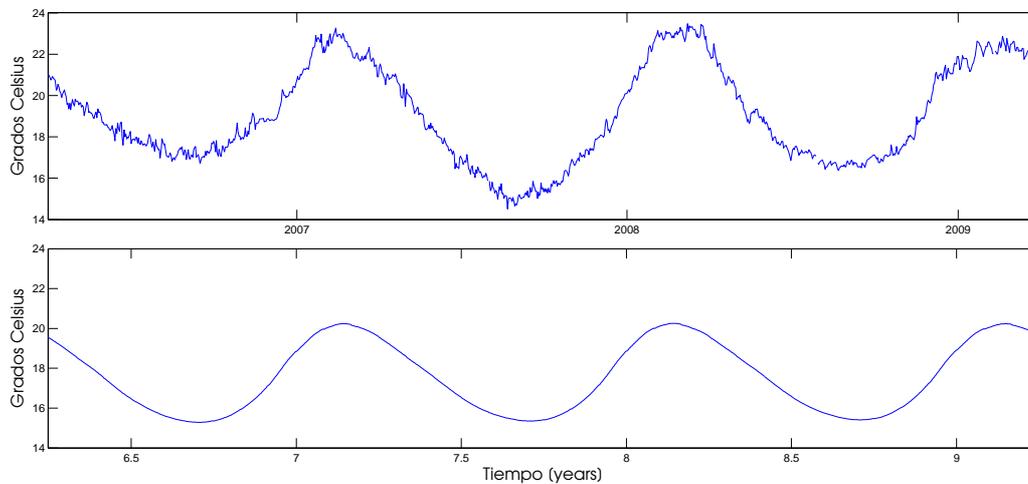


Figura 3.6: Serie de promedios diarios de los datos de temperatura superficial de la base de datos OSTIA en el periodo de tiempo comprendido entre Abril del año 2006 y Marzo del año 2009. El gráfico inferior muestra un promedio de la temperatura superficial diario para los últimos diez años obtenidos de la simulación

antes de finalizar el año, manteniendo este comportamiento a través de los años, simulados como en los datos reales. Claramente puede observarse que aunque la señal que modula los datos reales se presentan también en los resultados del cálculo, los datos reales presenta mucho más ruido.

3.3.2. Promedios Mensuales de Temperatura Superficial

Tanto los datos como los resultados del cálculo son diarios, pero los fenómenos de filamentos no son claramente apreciables en los datos del OSTIA. En la figura 3.3.2 puede verse esta diferencia en el detalle, ya que mientras el modelo entrega resultados para un punto determinado, donde las ecuaciones son resueltas, los datos han pasado por la interpolación y por el hecho que el satélite obtiene datos de una región. Estos dos últimos aspectos pueden ser algunos de los hechos que produzcan un suavizamiento en los datos de temperatura superficial y por ello la pérdida de un detalle bastante fino como para ver los filamentos. La zona de filamentos para los cálculos corresponde a la zona de bajas temperaturas en las mediciones. A excepción del año 2009, donde la zona de filamentos sólo parece estar bajo los efectos de la surgencia,

ya que la zona de bajas temperaturas esta remitida a un área muy cercana a la costa que no se extiende hacia en el interior. Es posible que los filamentos se presentarán mas tarde durante el año.

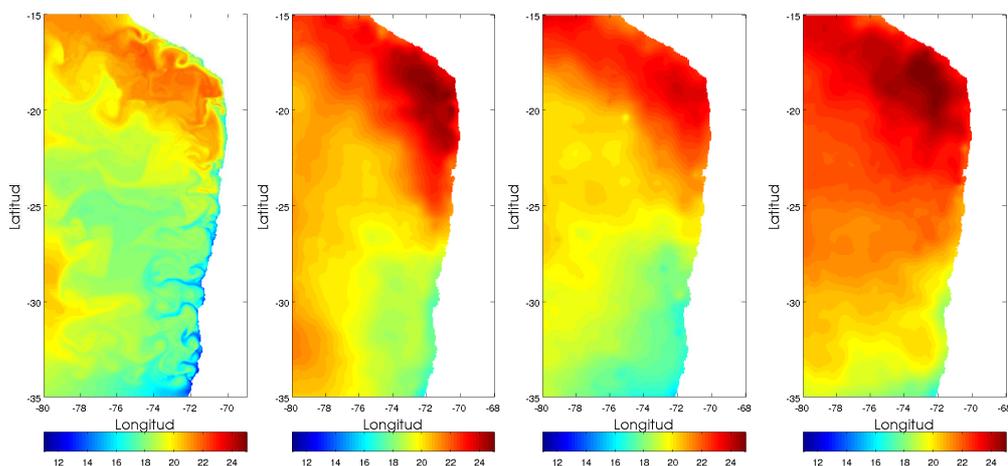


Figura 3.7: Desde la izquierda a la derecha. Temperatura en la última capa sigma (superficie) para el primer día del año 8 de simulación. los siguientes tres gráficos corresponden a los datos OSTIA para el primer día de los años 2007, 2008 y 2009 correspondientemente.

En vista de lo mencionado anteriormente, se realizó un promedio de los datos que se tenían por mes. Los datos diarios corresponden a la sección de tiempo entre abril del año 2006 y marzo del año 2009, por lo cual el promedio comprendió tres meses. Para los resultados del modelo se realizó un promedio mensual entre los últimos 10 años de simulación, los primeros dos se obviaron. Hemos de considerar que el modelo posee meses de 30 días lo cual equivale a años de 360 días.

Los resultados pueden verse en la figura 3.8, donde los promedios mensuales correspondientes a los meses de Enero, Abril, Julio y Octubre para los datos y los meses 1, 4, 7 y 10 respectivamente para los cálculos son expuestos. Rápidamente puede verse que en general los resultados de los cálculos arrojan temperaturas más frías de lo que datos OSTIA muestran. Recordamos también que los datos que fuerzan corresponden al período de tiempo 1945 - 1989.

A pesar de la diferencia de temperatura de un grado aproximadamente,

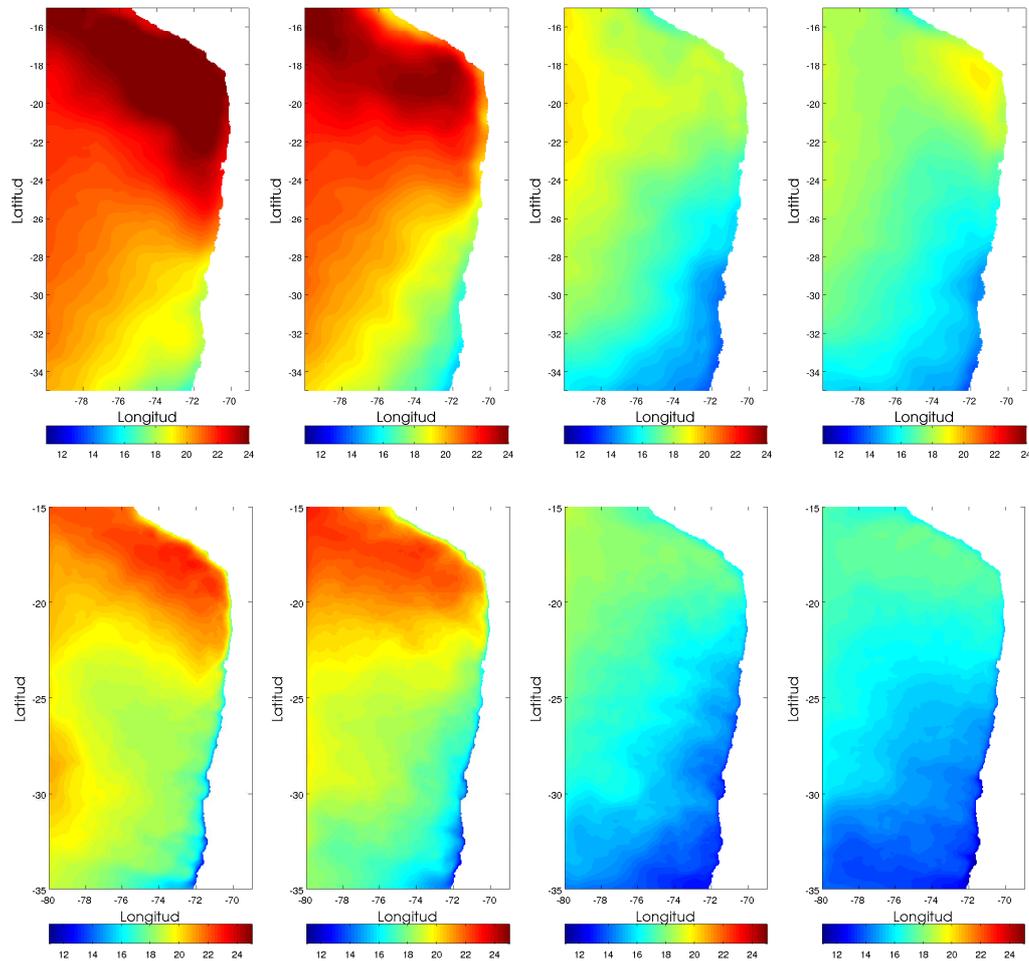


Figura 3.8: Los gráficos de la fila superior corresponden al promedio de temperatura superficial para los meses de Enero (2007-2009), Abril(2006-2008), Julio(2006-2008) y Octubre(2006-2008). La fila inferior contiene gráficos con el promedio de temperatura para la capa sigma mas cercana a la superficie para los últimos 10 años de cálculo, correspondiente a los meses 1 , 4, 7, y 10

los datos y resultados arrojan una distribución o morfología muy similar. Altas temperaturas para el primer semestre y una baja de estas para el segundo semestre son representadas por el modelo. La surgencia a través de la costa también es representada por los cálculos.

En el promedio mensual para el primer mes del año en los cálculos mues-

tran un impacto de los filamentos que, aunque es suave, es notorio. Además el promedio abarcó 10 años, lo cual indica de que los filamentos tuvieron la tendencia a presentarse en ciertos lugares a través de los años simulados. En adición puede advertirse un bajo impacto de las condiciones iniciales en el lugar donde los filamentos se presentan para los primeros dos o tres meses de cálculo.

3.4. Filamentos

3.4.1. Identificación y Ubicación

Para ver el impacto de las distintas variaciones realizadas en la simulaciones, se procedió a contar los filamentos. De esta manera se identificaron y ubicaron los filamentos que creíamos respondieron al criterio anteriormente planteado y resumido en la tabla 2.3.

Como resultado de este conteo puede verse la figura 3.9, con historigramas que representan el número de filamentos por ubicación en la costa chilena. En éstos puede observarse que la zona en torno a los 30 grados de latitud sur presentó el mayor número de filamentos en la mayoría de las simulaciones, esto corresponde al sector de la Serena/Coquimbo. Sin embargo, para la línea de costa suavizada (**20.Suavizada.ETOPO**) este comportamiento cambia presentado un número muy bajo de filamentos que cumplían con el criterio. Además el proceso de surgencia presentaba un comportamiento similar a un burbujeo de agua fresca hacia el interior del océano, lo cual sería la razón de que los filamentos no se formaran.

Para los cambios de batimetría, que creemos no son suficientes (solo dos), puede observarse una disminución en el número de filamentos, pero una distribución muy similar, presentado la mayor concentración en torno a los 30 grados de latitud sur y otra alza en el número de filamentos para la zona en torno a los 25 grados de latitud sur. Observando los historigramas de las simulaciones **20.Original.ETOPO** y **20.Original.GEBCO** (figura 3.9) puede apreciarse que esta última utilizando la base de datos GEBCO, presentó una disminución de filamentos. Lo anterior podría guardar relación con el hecho de que la zona costera presenta en general mayores profundidades para la interpolación proveniente de la base de datos ETOPO, como muestra la figura 3.2.

En la figura 3.10 puede verse la distribución de filamentos a través de los diez meses simulados. La época de verano es la que concentra la mayor cantidad de filamentos, sin embargo para la simulación con una línea de costa detallada (**20.Detallada.ETOPO**) la distribución es mas pareja a

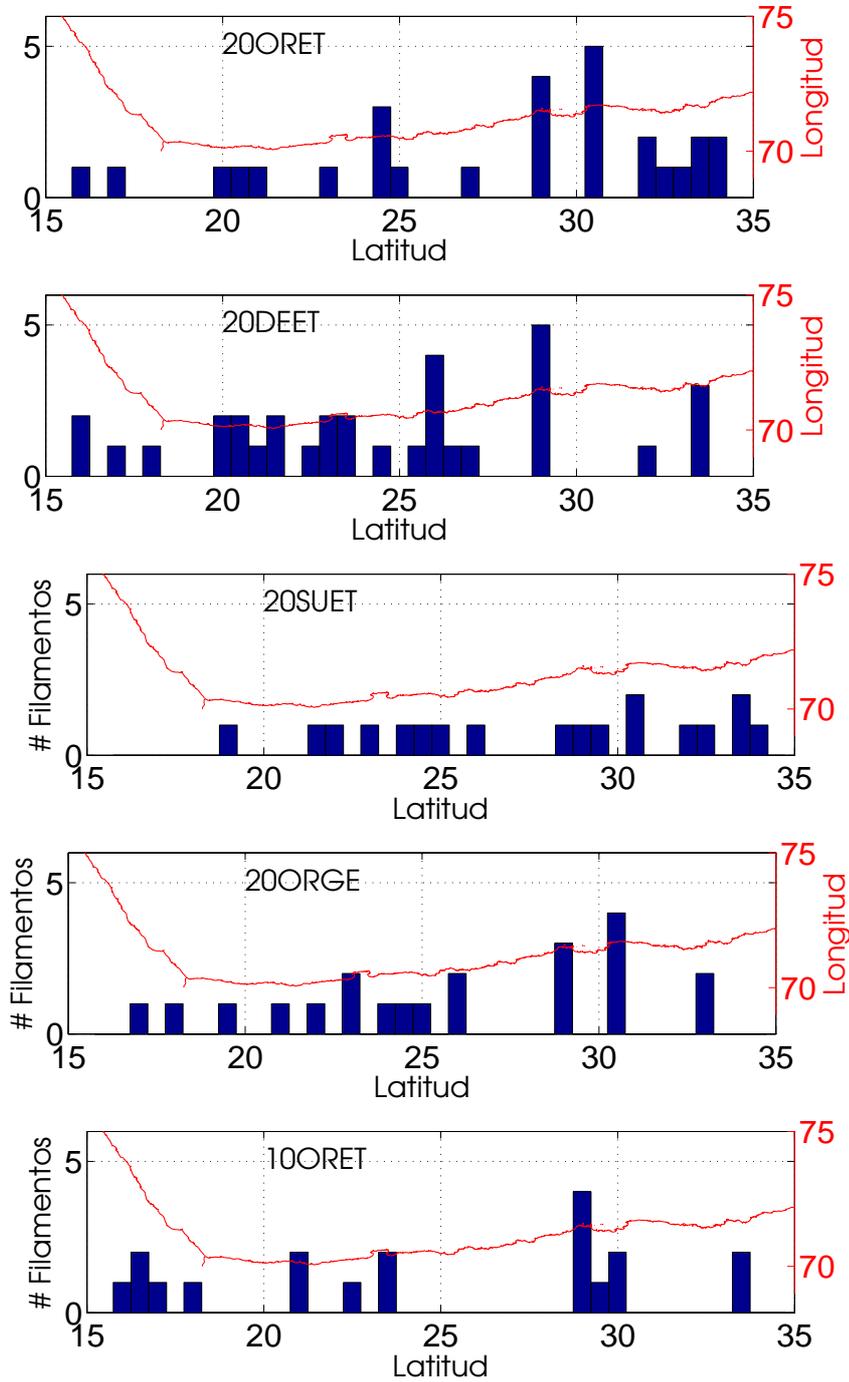


Figura 3.9: Historigramas de las simulaciones **20.Original.ETOPO**, **20.Detallada.ETOPO**, **20.Suavizada.ETOPO**, **20.Original.GEBCO** y **10.Original.ETOPO**, desde arriba hacia abajo correspondientemente, junto a la línea de costa chilena (línea roja)

través del año, pero conservando la mayor concentración en verano. Para el caso de la simulación con una resolución de 10 km el número de filamentos se ve fuertemente mermado, esto puede estar relacionado con el hecho de que los filamentos que pueden ser contabilizados solo son de grandes dimensiones. A pesar de lo anterior, la simulación de menor resolución presenta un importante concentración para el período de verano.

Para el periodo de tiempo entre el mes 12 y 1, lo que vendría siendo Diciembre y Enero, se presento el mayor número de filamentos en conjunto o al mismo tiempo. Las figuras 3.11, 3.12, 3.13 y 3.14 son el estado de la temperatura y el campo de velocidades superficial para cada una de las distintas configuraciones en el primer día del octavo año de simulación.

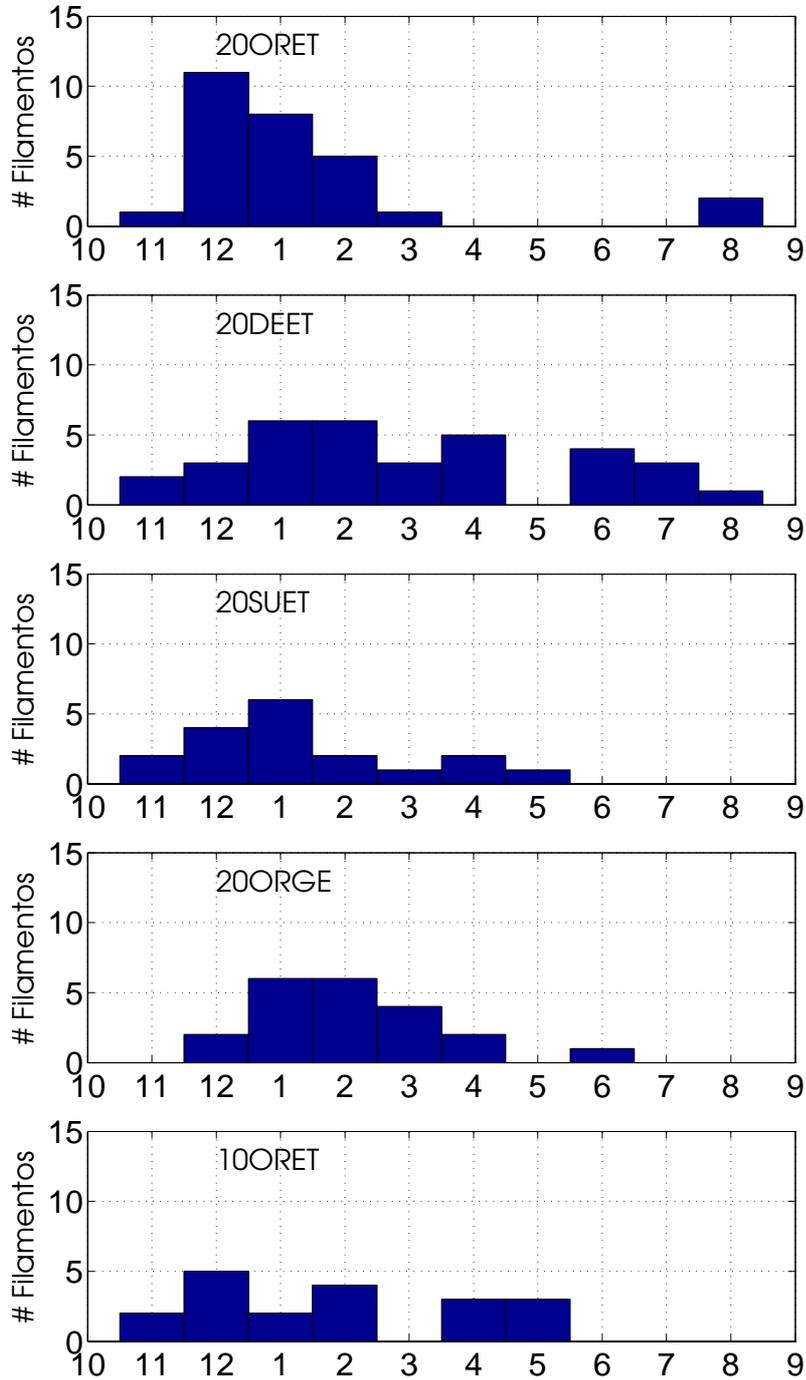


Figura 3.10: Historigramas de las simulaciones **20.Original.ETOPO**, **20.Detallada.ETOPO**, **20.Suavizada.ETOPO**, **20.Original.GEBCO** y **10.Original.ETOPO**, desde arriba hacia abajo correspondientemente indicando en que periodo del año se presentaban

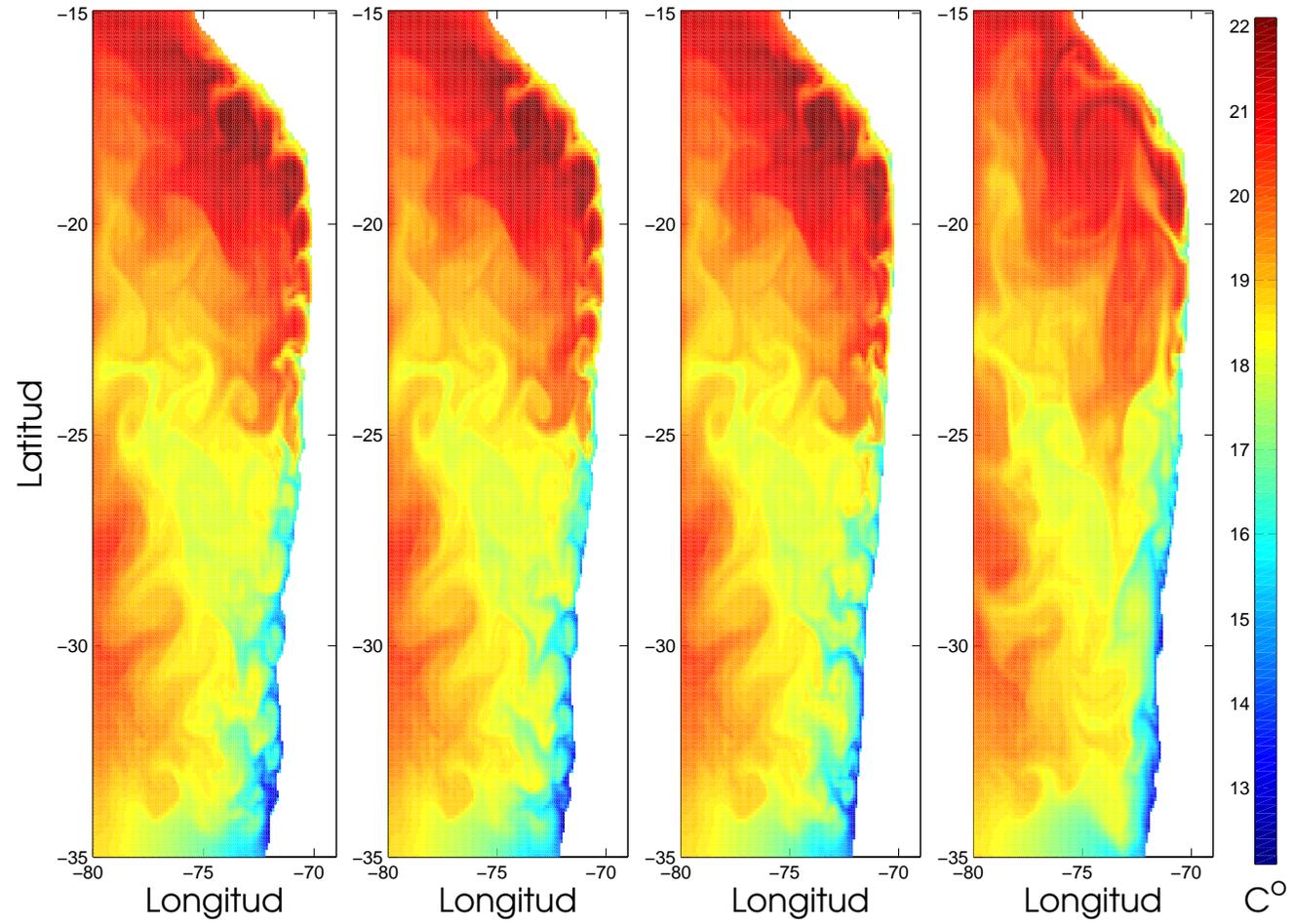


Figura 3.11: Resultados de temperatura superficial con 10 kilómetros una resolución pra las configuraciones **10.Detallada.ETOPO**, **10.Original.ETOPO**, **10.Suavizada.ETOPO** y **10.Original.GEBCO**, de izquierda a derecha correspondientemente. Los datos expuestos corresponden al día 16 del primer mes del octavo año

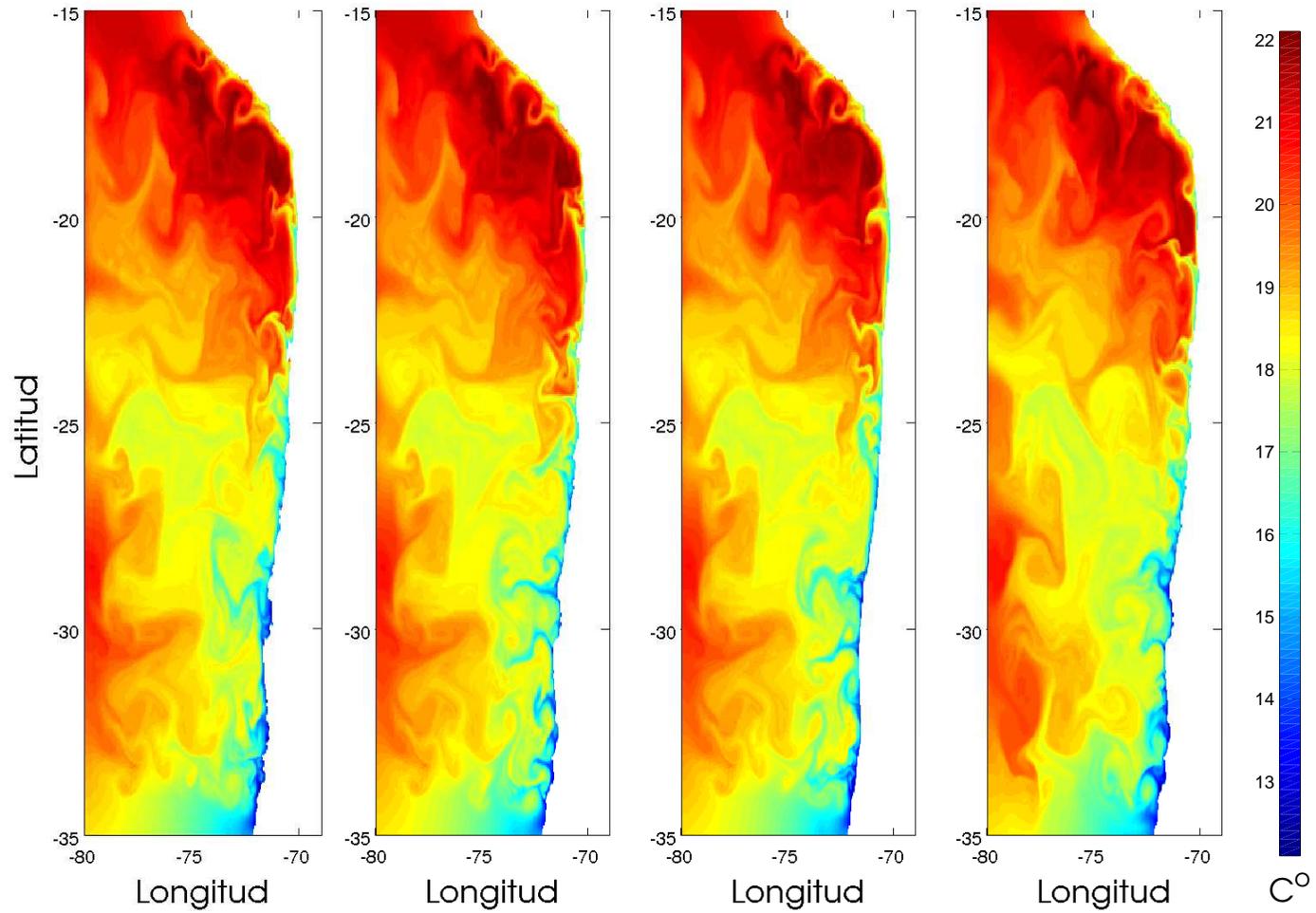


Figura 3.12: Resultados de temperatura superficial con 5 kilómetros una resolución pra las configuraciones **20.Detallada.ETOPO**, **20.Original.ETOPO**, **20.Suavizada.ETOPO** y **20.Original.GEBCO**, de izquierda a derecha correspondientemente. Los datos expuestos corresponden al día 16 del primer mes del octavo año

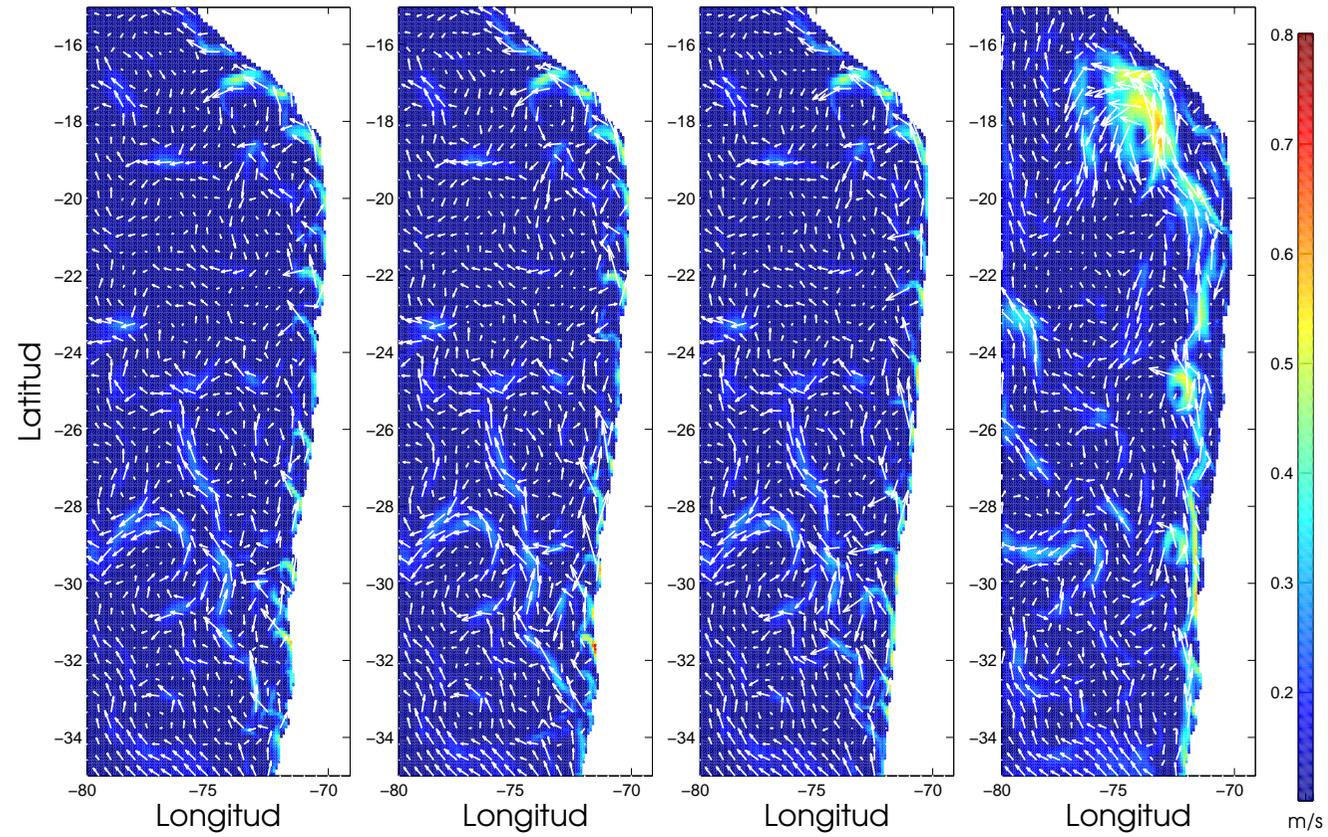


Figura 3.13: Resultados de velocidades superficiales con 10 kilómetros una resolución pra las configuraciones **10.Detallada.ETOPO**, **10.Original.ETOPO**, **10.Suavizada.ETOPO** y **10.Original.GEBCO**, de izquierda a derecha correspondientemente. Los datos expuestos corresponden al día 16 del primer mes del octavo año

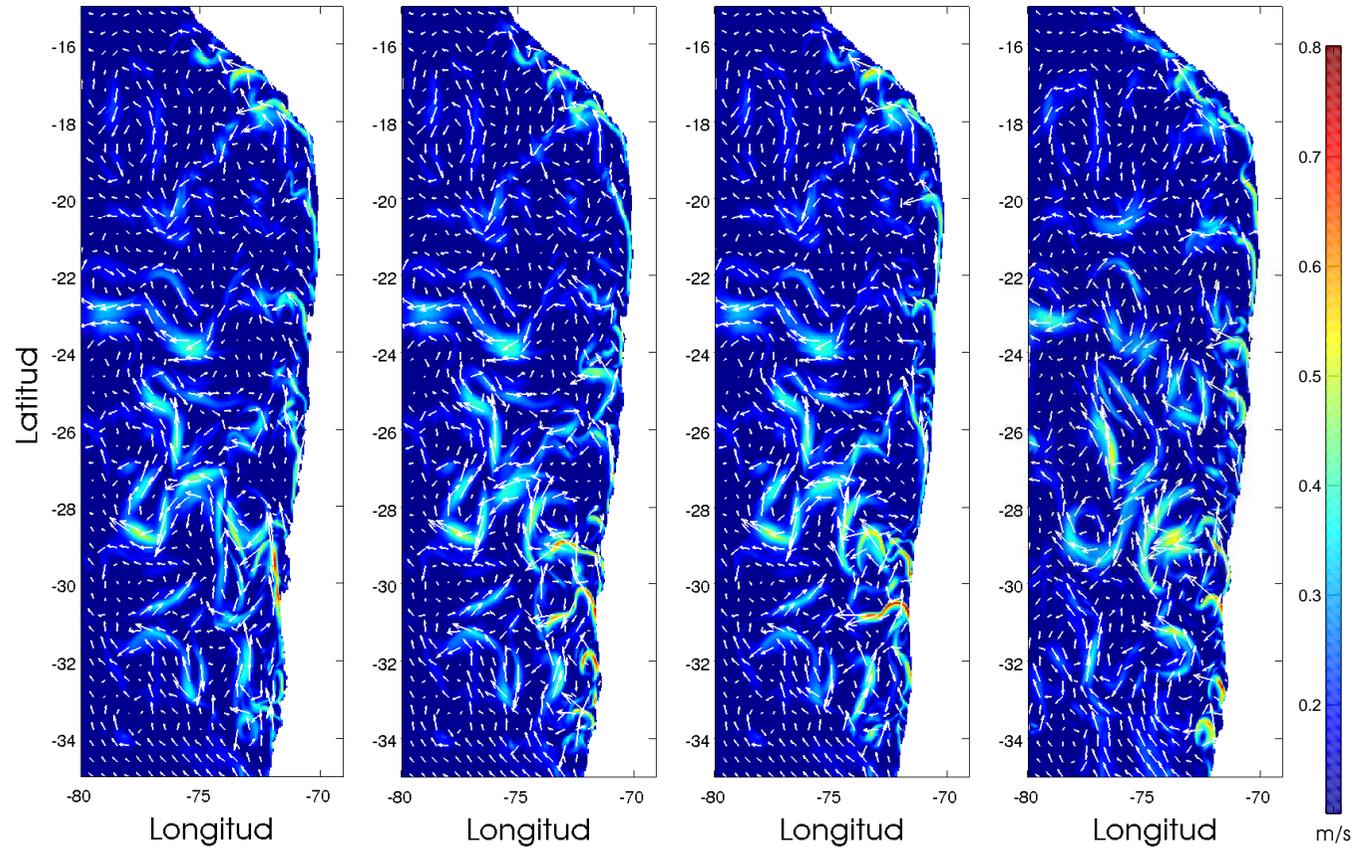


Figura 3.14: Resultados de velocidades superficiales con 5 kilómetros una resolución pra las configuraciones **20.Detallada.ETOPO**, **20.Original.ETOPO**, **20.Suavizada.ETOPO** y **20.Original.GEBCO**, de izquierda a derecha correspondientemente. Los datos expuestos corresponden al día 16 del primer mes del octavo año

3.4.2. Dimensiones, Transporte y Velocidad

Para realizar un análisis en más detalle se seleccionaron algunos filamentos para realizar mediciones de las dimensiones y velocidades y con ello calcular de forma aproximada el transporte de agua generado por estos fenómenos.

Investigaciones sobre filamentos frente a las costas de California [Flament et al., 1985], Lüderitz [Lutjeharms et al., 1991] y Guajira [Andrade and Barton, 2005] han observado filamentos sobre los 200 km de largo con velocidades entre los 40 y 60 cm/s . Los resultados de las simulaciones poseen velocidades dentro de este mismo rango para los filamentos de surgencia que se presentaron en la costa, como puede observarse en las figuras 3.13 y 3.14.

La figura 3.15 muestra una sección de la simulación donde se presentó un filamento frente a Coquimbo. Las magnitudes de velocidad muestran un máximo, en el medio del filamento, sobre los 0.56 [m/s], lo cual está dentro del rango mencionado anteriormente. La diferencia de la temperatura entre el centro del filamento y su entorno, es aproximadamente de unos 2 grados Celsius. El largo del filamento es de 280 kilómetros aproximadamente, unos 200 km desde la costa hasta que se curva y unos 80 kilómetros desde la curva hasta la cabeza de martillo. En la parte superior izquierda puede verse un remolino, con sentido horario, con el cual el filamento se topa y sigue su forma, creando una formación similar a la cabeza de un martillo.

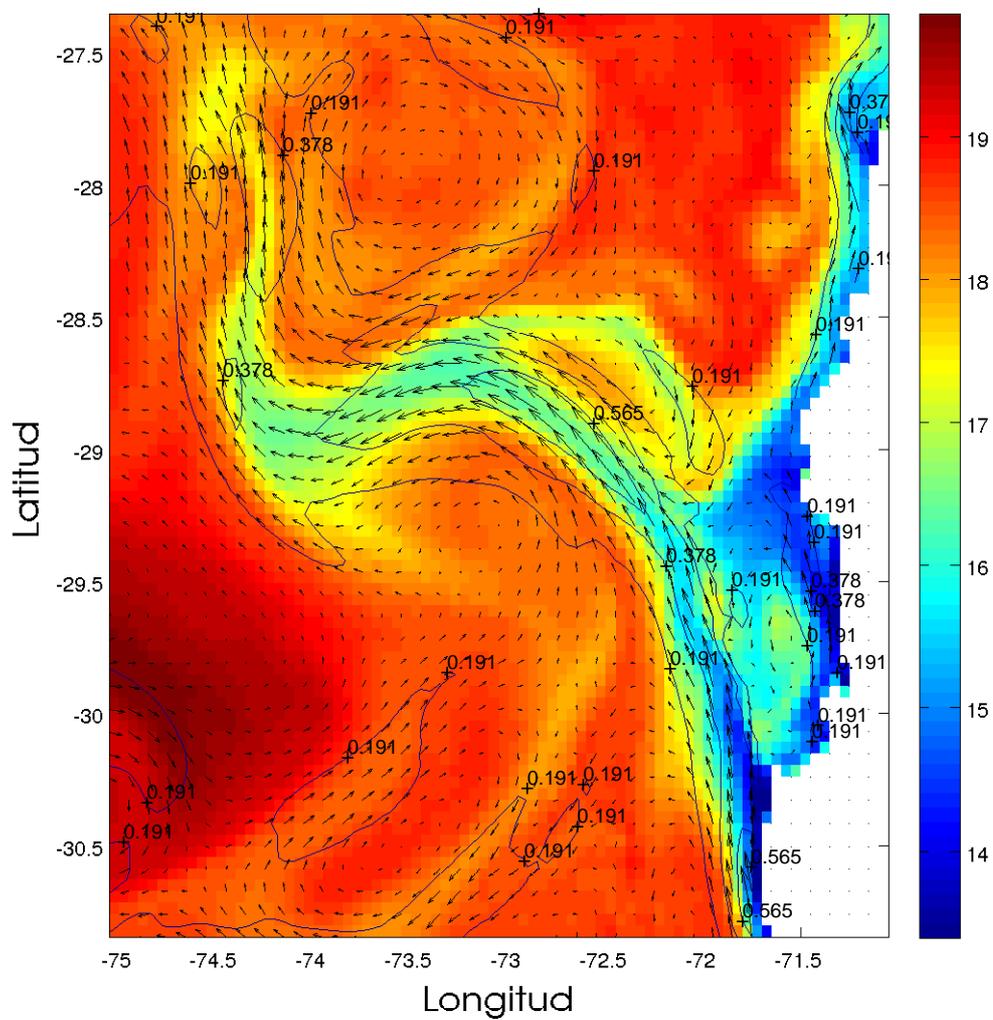


Figura 3.15: Filamento presente en la simulación para el día 16 de primer mes del año 8. En colores puede observarse la temperatura en $^{\circ}\text{C}$. Los vectores representan la velocidad y las isoclinas representan la rapidez [m/s]

Capítulo 4

Conclusiones y Discusiones

4.1. Sensibilidad

El estudio de sensibilidad concluyó que los filamentos son sensibles a las modificaciones mencionados, aunque de distintas formas a cada una de las modificaciones. Las conclusiones se exponen a continuación.

4.1.1. Línea de Costa

Las variaciones de la línea de costa en la máscara, mostró efectos tanto en la frecuencia como en la duración de los filamentos. En la figura 3.3 se ve que la mayor diferencia está entre la costa Suavizada y las costas Detallada y Original. El número de filamentos bajo para la Suaviza, manteniéndose similar para la Original y Detallada. Pero a pesar de lo anterior en la figura 3.10, puede observarse que los resultados entre la línea de costa Detallada y Original, son distintos. La diferencia se presentó en la distribución de los filamentos durante el año, donde para la Original se concentraron entre los meses de Diciembre - Febrero y durante todo el año para la Detallada, concentrando sus máximos en Enero y Febrero. Adicionalmente cabe mencionar que la duración de los filamentos aumento con el detalle de la línea de costa.

Lo que si se mantuvo, fueron las regiones donde se presentaban con mayor frecuencia los filamentos y el periodo en el año donde estos se concentraban. La región entre los 29 y 30 grados de latitud, concentro para cada simulación un porcentaje importante del número de filamentos total. Aunque para la línea de costa Detallada los filamentos en el norte se hicieron más frecuentes.

Comparando las figuras 3.13 y 3.2, debemos mencionar que para una grilla de 10 kilómetros, el impacto del cambio en la batimetría se ve reflejado en el campo de velocidades superficial.

4.1.2. Resolución

Las resoluciones usadas fueron para un punto cada 10 y 5 kilómetros aproximadamente. Los histogramas para una resolución de 10 kilómetros, parecen haber sido filtrados al compararlo con el de 5 kilómetros de resolución. Pensamos que una de las razones es que la resolución de 10 kilómetros sólo permite observar filamentos de grandes dimensiones. Las áreas de mayor frecuencia se mantienen para Coquimbo y Antofagasta.

Hemos de mencionar que el cambio en la resolución trajo consigo modificaciones en la línea de costa y batimetría. Esto sumado a que las diferencias causada por la nueva resolución, tuvieron mayor oportunidad de crecer al simular siete años. Mientras que las diferencias por los cambios en la línea de costa y batimetría solo tuvieron 10 meses para crecer.

4.1.3. Batimetría

La distribución de los filamentos para el cambio de batimetría se mantuvo similar, pero el número de filamentos disminuyó. Ambas configuraciones mostraron para la región de Coquimbo y Antofagasta una tendencia mayor a presentar filamentos. Para la distribución en el tiempo la batimetría GEBCO mostró los meses de Enero y Febrero como los de mayor frecuencia, mientras que la batimetría ETOPO los concentró entre Diciembre - Febrero.

4.2. Filamentos

Los filamentos resultantes de los cálculos mostraron dimensiones y velocidades dentro de los rangos expuestos en la literatura, así como las regiones expuestas en la literatura coincidieron con la formación de filamentos en los cálculos. Las velocidades se presentaron entre los 0.3 y 0.6 m/s, presentando cierta relación con el largo del filamento, el cual se encontró entre los 100 y 400 kilómetros. Las velocidades sobre los 0.5 m/s, estuvieron relacionadas con filamentos de largo sobre los 200 kilómetros.

4.3. Paralelización y Tiempo de calculo

Aunque el cálculo no fue realizado en un cluster, a través de la interfase MPICH2 fue posible utilizar un computador multicore para realizar un trabajo multiprocesos. Esto significó ahorrar tres cuartos del tiempo de un cálculo serial en la misma máquina de ocho cores. Y aunque la ganancia de trabajar con ocho cores es alta, utilizando dos o tres cores ya tenemos una

ganancia considerable (45 % y 59 % respectivamente), como puede verse en la figura 3.4.

La interfase OpenMP y MPICH2 produjeron ganancias similares, a pesar de ser OpenMP la interfase desarrollada principalmente para memoria compartida. Finalmente OpenMP con 16 hilos y MPI con 8 procesos presentaron un tiempo de cálculo dentro del mismo rango.

Creemos que para un inicio el trabajo con OpenMP, es una forma bastante rápida de implementar ROMS_AGRIF de forma paralela. Pero si existe la intención de utilizar un cluster o alguna herramienta de memoria distribuida en un futuro, sería recomendable trabajar con MPICH2.

4.4. Dificultades y Problemas

Las principales dificultades donde se enfocó la mayor cantidad de tiempo fue en aprender a utilizar el modelo ROMS_AGRIF, implementar la interfase MPICH2 y contar los filamentos.

Los principales problemas los tuvimos con la limitación técnica de la capacidad de almacenamiento en los servidores y un método bastante básico y lento en el conteo de filamentos.

4.5. Para continuar

Algunos puntos que nos gustaría haber alcanzado y creemos sería bueno poder realizarlos en una investigación siguiente son : una validación de datos más detallada y fuerte, el desarrollo de un método automatizado para la identificación y medición de los filamentos, realizar los cálculos en un cluster de mayor capacidad para las simulaciones Secundarias por un periodo de tiempo mayor y por último incluir las mareas para ver el impacto tanto en los filamentos como en la conservación de volumen.

Apéndice A

ROMS AGRIF y ROMSTOOLS

Existen muchos modelos numéricos para el estudio de la circulación en el océano, uno de los más utilizados en estos últimos años ha sido el ROMS (Regional Ocean Modeling System). Este mismo hecho de ser muy utilizado ha llevado a que muchas rutinas de pre y post procesamiento creadas por los mismos usuarios sean públicas, facilitando el trabajo. Sin embargo, en un trabajo mas formal, el IRD desarrolló el conjunto de herramientas ROMSTOOLS. Serán estas últimas herramientas (ROMSTOOLS) que se explicarán a continuación junto con el modelo ROMS_AGRIF.

El modelo ROMS puede ser obtenido desde <http://www.myroms.org/>. ROMSTOOLS junto con del código de ROMS_AGRIF se obtienen desde <http://roms.mpl.ird.fr/>

A.1. ROMS AGRIF

ROMS (Regional Ocean Modeling System) es un modelo oceánico regional con las siguientes características:

- superficie libre
- hidrostático

con bordes abiertos robustos, ecuaciones primitivas, utiliza capas sigmas que siguen la forma del fondo. El modelo puede trabajar en forma serial o paralela (OpenMP y MPI, ver apéndice C), las ecuaciones de momento baroclínico y barotrópico son resueltas de forma separada [Marchesiello et al.,

2001], posee módulos para sedimentos y ecosistemas [Penven et al., 2007]. El nombre AGRIF (Adaptative Grid Refinement In Fortran) que posee el modelo, está relacionado a con el hecho que el código se modificio para que trabaje con anidados. REESCRIBIR Esto último significa que es posible realizar simulaciones pequeñas dentro de la simulación principal con diferentes propósitos, pero generalmente con el objetivo de tener una mayor resolución de un area más pequeña.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla u - fv = -\frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{u'w'} - \nu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \mathcal{F}_u + \mathcal{D}_u \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla v + fu = -\frac{\partial \phi}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{v'w'} - \nu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \mathcal{F}_v + \mathcal{D}_v \quad (\text{A.2})$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla C = -\frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{C'w'} - \nu_\theta \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \mathcal{F}_C + \mathcal{D}_C \quad (\text{A.3})$$

$$\rho = \rho(T, S, P) \quad (\text{A.4})$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = -\frac{\rho g}{\rho_o} \quad (\text{A.5})$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{A.6})$$

$$\overline{u'w'} = -K_M \frac{\partial u}{\partial z}; \quad \overline{v'w'} = -K_M \frac{\partial v}{\partial z}; \quad \overline{C'w'} = -K_C \frac{\partial C}{\partial z}. \quad (\text{A.7})$$

Las ecuaciones utilizadas son expuestas dentro de la misma página de ROMS [Webpage de ROMS,], y más adelante presentamos las principales ecuaciones utilizadas. Las dos primeras ecuaciones (A.1 y A.2) representaciones del balance de momento en el plano xy, la ecuación A.3 está expresada para la evolución temporal de un campo de concentración escalar $C(x,y,z,t)$, como por ejemplo salinidad, temperatura o nutrientes que son gobernados por la ecuación de difusión advectiva. Luego tenemos la ecuación de estado A.4, la ecuación de continuidad A.6. En la tabla A.1 pueden verse los términos utilizados en las ecuaciones de ROMS.

Las **condiciones de borde abierto** utilizadas son las de Marchesiello. Según la descripción de estas condiciones [Marchesiello et al., 2001], los flujos de información que salen y entran son tratados de manera separada, utilizando la estimación de la velocidad de fase para poder separar estos dos grupos. El método recién descrito se utiliza para determinar cuando el borde tiene propagación hacia el interior (borde activo) o exterior (borde pasivo). Para el caso de la propagación hacia el exterior se utiliza la extrapolación de radiación, de esta forma la información pasará a través del borde con una reflexión mínima. Para el caso de la información entrante, es decir que las ecuaciones requieren de información externa, la solución puede ser relacionada a los datos externos sin causar mayores problemas.

$\mathcal{D}_u, \mathcal{D}_v, \mathcal{D}_C$	términos difusivos
$\mathcal{F}_u, \mathcal{F}_v, \mathcal{F}_C$	términos forzantes
$f(x,y)$	parámetro de Coriolis
g	aceleración de gravedad
$h(x,y)$	profundidad del fondo
ν, ν_θ	viscosidad y difusividad molecular
K_m, K_C	viscosidad y difusividad turbulenta vertical
P	presión total $P \approx -\rho_o g z$
$\phi(x, y, z, t)$	presión dinámica $\phi = (P/\rho_o)$
$\rho_o + \rho(x, y, z, t)$	densidad in situ total
$S(x, y, z, t)$	salinidad
t	tiempo
$T(x, y, z, t)$	temperatura potencial
u, v, w	componentes del vector velocidad \vec{v}
x, y	coordenadas horizontales
z	coordenadas verticales
$\zeta(x, y, t)$	elevación de la superficie

La grilla utilizada en el modelo es del tipo Arakawa C. La distribución de las variables puede observarse en la figura A.1. Las salidas de temperatura, salinidad, densidad y nivel del mar están resueltas en los puntos ρ de la grilla. Las componentes de velocidad están indicadas (u y v). De lo anterior, se desprende que las dimensiones de las matrices con datos no son las mismas para todas las variables.

Los datos de la frontera deben ser entregados al modelo, así como los forzantes y condiciones iniciales. No obstante, estos se pueden generar de manera analítica como una segunda opción. Para esto último se han creado múltiples rutinas para facilitar el trabajo, de las cuales utilizamos ROM-STOOL, la que describimos a continuación.

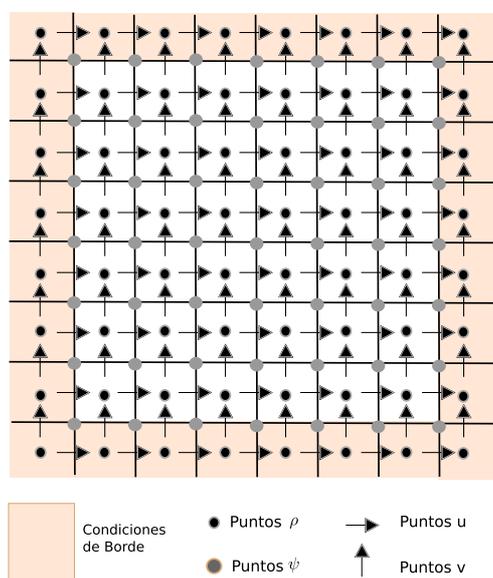


Figura A.1: Diagrama de la Grilla Arakawa C

Apéndice B

Tablas de Filamentos

Tabla B.1: Datos correspondientes a la simulación de 10 kilómetros de resolución, con la línea de costa Original y una batimetría interpolada de la base de datos ETOPO

Día Inicial	Día Final	Mes	Año	Posición	Orientación	Largo	Gradiente
9	20	11	7	21.	0.	100.	2.5
3	9	12	7	16.5	90.	150.	2.0
24	28	12	7	16.5	90.	150.	3.0
9	13	1	8	18.0	45.	100.	3.0
14	23	4	8	16.0	70.	200.	4.0
19	3	5	8	17.0	60.	100.	3.0
15	23	2	8	21.0	0.	150.	3.5
22	30	4	8	22.5	-10.	150.	3.0
26	30	5	8	23.5	-60.	200.	3.0
15	18	1	8	23.5	0	100.	2.0
22	2	11	7	30.	-45.	150.	3.0
16	19	12	7	29.	-10.	100.	2.0
14	18	12	7	30.	0.	200.	3.0
21	26	12	7	29.	-30.	200.	3.0
12	19	2	8	29.0	-50.	100.	4.0
2	8	5	8	29.0	-45.	200.	4.0
21	3	4	8	29.5	0.	200.	3.0
8	19	2	8	33.5	20.	250.	4.5
19	15	2	8	33.5	20.	250.	4.5

Tabla B.3: Datos correspondientes a la simulación de 5 kilómetros de resolución, con la línea de costa Detallada y una batimetría interpolada de la base de datos ETOPO

Día Inicial	Día Final	Mes	Año	Posición	Orientación	Largo	Gradiente
8	15	1	8	17.0	-20.	200	2.0
18	20	2	8	16.0	-80.	200	3.0
15	20	3	8	16.0	-45.	150	2.5
8	12	12	7	20.0	10.	100	3.0
10	16	1	8	20.5	-70.	150	3.0
9	14	2	8	21.0	-30.	100	2.5
4	12	4	8	18.	30.	250	3.0
27	19	4	8	20.5	0.	150	3.0
13	17	6	8	21.5	-10.	200	3.0
12	14	7	8	20.0	20.	150	3.0
25	3	2	8	23.	-60.	200	3.5
27	26	3	8	23.5	-45.	200	3.0
22	1	3	8	22.5	-20.	100	3.0
14	16	6	8	21.5	-20.	100	3.0
25	30	6	8	23.5	-45.	100	2.0
11	13	7	8	23.0	-30.	100	3.5
27	29	11	7	26.	0	150	2.5
17	19	1	8	26.	-10.	200	2.5
26	8	1	8	26.	0.	300	2.5
16	27	2	8	25.5	-10	100	3.0
30	3	2	8	24.5	0	100	2.5
21	24	4	8	26.5	0	200	2.0
20	26	2	8	27.0	0.	150	3.5
13	19	7	8	26.0	0.	100	3.5
15	15	1	8	29.0	-30.	300	3.0
8	11	4	8	29.0	0.	300	4.0
21	23	4	8	29.0	-10	100	3.0
14	7	6	8	29.0	-10.	200	2.5
25	27	12	7	29.0	20.	150	3.5
24	26	11	7	33.5	-10	150	3.0
26	21	12	7	33.5	-20.	150	3.0
2	4	1	8	33.5	0	150	3.0
23	27	8	8	32.0	0	250	2.5

Tabla B.5: Datos correspondientes a la simulación de 5 kilómetros de resolución, con la línea de costa Original y una batimetría interpolada de la base de datos ETOPO

Día Inicial	Día Final	Mes	Año	Posición	Orientación	Largo	Gradiente
5	10	12	7	29.0	0.0	150	3.5
26	30	11	7	30.5	-45.0	100	2.0
13	20	12	7	29.0	0.0	200	3.0
28	4	12	7	29.0	0.0	300	3.0
27	4	1	8	30.5	-20.0	300	3.0
13	16	2	8	30.5	0.0	150	2.0
30	7	2	8	29.0	-20.	100	3.5
30	4	2	8	30.5	-50.	100	3.5
20	28	12	7	30.5	20.0	150	3.0
4	13	12	7	33.5	0.0	150	3.0
19	25	12	7	34.0	-45.	150	2.0
19	28	12	7	32.5	0.	100	3.5
30	2	12	7	33.5	0.	100	3.0
20	26	1	8	34.0	-40.	150	3.0
27	30	1	8	33.0	10.	150	2.0
17	21	8	8	32.0	0.	150	2.0
17	21	8	8	32.0	0	150	2.0
9	13	12	7	25.0	20.	100	2.0
23	30	12	7	24.5	-20.	150.	2.0
3	19	1	8	24.5	-10.	250	2.0
16	21	1	8	27.0	-50.	200	3.0
23	29	3	8	24.5	-45.	200	3.0
7	18	12	7	20.0	45.	150	2.5
7	12	1	8	20.5	-45.	200	3.0
10	20	1	8	17.0	40.	250	2.0
25	5	2	8	23.0	-50	150	2.5
16	20	1	8	21.0	-45.0	250	3.0
22	25	2	8	16.0	90.	200	2.0

Tabla B.7: Datos correspondientes a la simulación de 5 kilómetros de resolución, con la línea de costa Original y una batimetría interpolada de la base de datos GEBCO

Día Inicial	Día Final	Mes	Año	Posición	Orientación	Largo	Gradiente
28	6	3	8	18.0	0.	200.	3.0
23	2	4	8	17.0	80.	100	3.0
24	27	4	8	19.5	0.	100.	4.0
10	16	12	7	21.0	0.	200.	2.5
14	17	1	8	24.0	0.	100	2.0
30	2	1	8	24.5	-70.0	150.	3.0
9	23	2	8	23.0	0.	250.	4.0
26	30	2	8	22.0	-60.	100.	2.0
10	15	3	8	23.0	-45.	150	3.0
7	10	3	8	26.0	-60.	150	2.0
13	21	6	8	25.0	-20.	100.	3.0
30	4	1	8	26.0	-45.0	200.	2.0
4	18	12	7	29.0	-20.	200.	3.0
7	17	1	8	29.0	0.	300.	3.0
19	24	1	8	30.5	10.	200.	3.0
5	7	2	8	30.5	0.	150	4.0
24	30	2	8	30.5	0.	100.	4.0
20	23	2	8	29.0	0.	100.	3.0
8	12	1	8	30.5	0.	100.	3.0
20	25	2	8	33.0	-10.	100.	3.0
6	16	3	8	33.0	0.	150.	3.0

Tabla B.9: Datos correspondientes a la simulación de 5 kilómetros de resolución, con la línea de costa Suavizada y una batimetría interpolada de la base de datos ETOPO

Día Inicial	Día Final	Mes	Año	Posición	Orientación	Largo	Gradiente
28	1	11	7	33.5	0.	100	3.0
30	3	11	7	28.5	10	100	3.0
11	15	12	7	25.0	0.	150	2.0
8	11	12	7	29.5	-45.	250	3.0
16	19	12	7	30.5	10.	250	3.0
28	2	12	7	30.5	10	250	3.0
8	12	1	8	29.0	0	250	3.0
10	14	1	8	23.0	0	100	4.0
16	21	1	8	33.5	-10.	150	3.0
16	18	1	8	26.0	-50	200	2.0
19	21	1	8	32.0	-10	200	3.0
24	28	2	8	34.0	-45	100	2.5
29	2	2	8	24.5	10.	100	3.0
15	23	4	8	19.0	-30.	150	2.0
28	30	1	8	21.5	-30.	100	2.0
25	3	3	8	24.0	0	150	3.0
2	6	4	8	22.0	-45.	150	2.0
30	5	5	8	32.5	0.	200	3.0

Apéndice C

Paralelización

Este apéndice tiene el objetivo de presentar una idea general del trabajo realizado por la interfase MPI y las librerías OpenMP, así como los detalles de cómo se implementó y utilizó para trabajar con ROMS compilado con el Gfortran.

Las interfases a describir están proyectadas para trabajar en máquinas computacionales que puedan desarrollar más de una tarea al mismo tiempo. El sistema más conocido o utilizado con estas interfases son los cluster. Estos últimos son un grupo de computadores conectados a través de algún sistema de comunicación (10 Gigabit Ethernet, InfiniBand, Myrinet, Quadrics). Se cuenta con un computador al cual nos conectamos para ejecutar los trabajos, y éste será el que separe la carga y divida el trabajo en los procesadores o cores. Hemos de notar que la forma en que se divide el trabajo inicial, también influye en el tiempo necesario de para ejecutarlo. Además existe la posibilidad de utilizar computadores multicores, los cuales traen integrado uno o mas de un procesador con multicores. Este caso se verá a continuación, aplicado en un computador multicore descrito en la tabla 2.1.

C.1. Interfase MPI

La interfase tiene como objetivo el intercambio de mensajes entre los procesos generados, así como su nombre lo indica Message Passing Interfase (MPI). Este intercambio de información nos permite dividir ciertos trabajos computacionales, para luego intercambiar la información necesaria entre ellos y así llegar a un solo objetivo. Esta interfase puede ser utilizada en los lenguajes de programación C, C++ y Fortran.

Como se lee en la página web de MPICH2 [], que es el utilizado en este

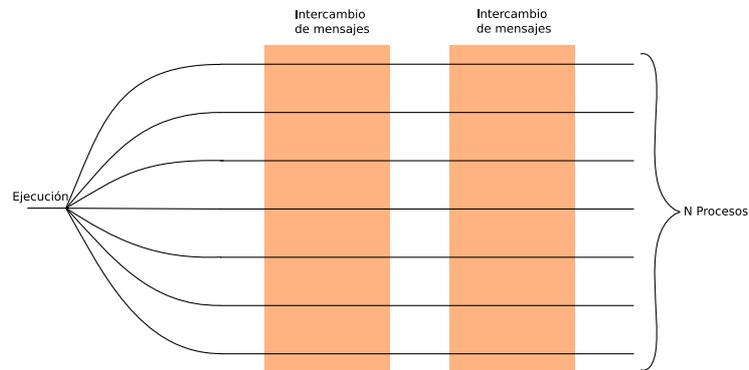


Figura C.1: Esquema General del trabajo con la Interfase MPI

estudio, este último ha sido desarrollado para ser usando tanto en cluster como máquinas de escritorio.

C.2. Interfase OpenMP

OpenMP se define como una Interfase de Programación Aplicada (API) para memoria compartida [Chapman et al., 2008], que teniendo un cálculo a realizar lo divide en hilos que se ejecutan en distintos procesadores o cores. Estos hilos tienen acceso a una memoria compartida común de la cual obtienen la información necesaria. De la misma forma esta interfase puede ser utilizada en los lenguajes de programación C, C++ y Fortran

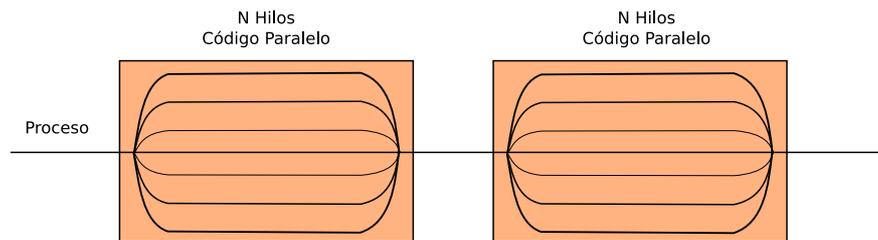


Figura C.2: Esquema General del trabajo con la Interfase OpenMP

En estricto rigor esta es la interfase que debería ser utilizada en el trabajo en los computadores multicore.

C.2.1. Implementación en ROMS

Para esta interfase la implementación es mas simple, ya que no se requiere la instalación separada de la interfase. Para el caso del compilador intel (ifort) y el compilador GNU (gfortran) la implementación de esta interfase se realiza agregando la bandera `-openmp` y `-fopenmp` respectivamente. Como utilizamos `gfortran`, debimos cambiar la bandera `-openmp` por `-fopenmp` en el archivo `jobcomp`. Esto nos llevó a una compilación exitosa, pero que presentaba problemas con el valor de algunas variables al iniciar la simulación.

Para poder realizar la simulación con menos de 16 hilos se realizó el siguiente procedimiento: el valor entregado por la función `omp_get_num_threads()` en el archivo `init_scalars.F` debe ser igual al valor de la variable `NPP` indicada en el archivo `param.h`. Esta variable (`NPP`) debe ser igual a la multiplicación de las variables `NSUB_X` y `NSUB_E` indicadas en el mismo archivo. Se le dio a la variable `numthreads` (que guarda el valor entregado por la función `omp_get_num_threads()` en el archivo `init_scalars.F`) el valor de hilos que se desea utilizar. Este mismo se debe realizar con la variable `NPP` en el archivo `param.h`. Finalmente, se realizó la división de la matriz a través de las variables `NSUB_X` y `NSUB_E`, cumpliendo con la descripción mencionada anteriormente.

Esto soluciono y permitió utilizar menos hilos de los indicados por el número de procesadores disponibles.

Apéndice D

Mecánica de Fluidos

Creo que como parte del estudio es necesario una revisión de las ecuaciones y la física presente detrás de los modelos numéricos para el océano, para ello realizaremos un estudio de las ecuaciones de la mecánica de fluidos revisando distintos documentos para tomarlo de un punto de vista lo mas simple y claro posible. Luego de esto veremos algunos modelos de ejemplo y como estos abordan la solución de estas ecuaciones. Puntos interesantes serán como enfrentan la viscosidad y los forzamientos, lo cual generalmente tiene diferencias de un modelo a otro.

D.1. Conservación de Masa

Supondremos un volumen dentro de un fluido y veremos como el fluido pasa por una pequeña sección de área en el límite del volumen. El flujo para esta pequeña sección de área puede ser definido como

$$\rho \vec{v} d\vec{l} \quad (\text{D.1})$$

donde ρ es la densidad del fluido, \vec{v} es la velocidad del en la sección y $d\vec{l}$ es la sección de área seleccionada y esta última se considerará tan pequeña que pueda ser aproximada a un plano donde el vector \vec{l} es perpendicular a este.

El flujo neto para el volumen seleccionado se obtendrá al integrar la ecuación D.1 en toda el área limítrofe del volumen, lo cual nos lleva a la ecuación D.2

$$\oint \rho \vec{v} \cdot d\vec{l} \quad (\text{D.2})$$

Suponiendo que ρ no es constante en el volumen entonces tenemos que la masa contenida dentro del volumen V queda expresada en la ecuación D.3

$$\int \rho dV \quad (\text{D.3})$$

Ahora nuestro interés está en ver como la masa varia dentro del volumen, de esta manera podemos comparar esta variación con las entradas y salidas de flujo. Por lo anterior tomamos la ecuación D.3 y la derivamos en el tiempo para ver como varia en el tiempo, llegando a la ecuación D.4

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV \quad (\text{D.4})$$

Ahora supondremos el caso en que la masa esta saliendo. Para esto la ecuación D.2 sera positiva ya que el flujo sale y el vector \vec{l} esta apuntando hacia el exterior del volumen, es decir, ambos están en el mismo sentido. Para el mismo caso pero aplicándolo a la ecuación D.4, tenemos que el volumen esta perdiendo masa lo cual nos da un sentido negativo. Ahora las ecuaciones D.2 y D.4 nos indican lo mismo pero con sentidos diferentes, lo cual podemos expresarlo como

$$\oint \rho \vec{v} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV \quad (\text{D.5})$$

Por el teorema de Green podemos expresar la ecuación anterior como

$$\begin{aligned} \int \nabla \cdot (\rho \vec{v}) dV &= -\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV \\ \frac{\partial}{\partial t} \int \rho dV + \int \nabla \cdot (\rho \vec{v}) dV &= 0 \\ \int \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int \nabla \cdot (\rho \vec{v}) dV &= 0 \\ \int \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) \right] dV &= 0 \end{aligned}$$

De esta ultima ecuación podemos decir que

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (\text{D.6})$$

La ecuación D.6 es llamada **ecuación de continuidad**

D.2. Conservación de Momentum

Las ecuaciones de momentum, provienen de la segunda ley de Newton sobre la variación de momentum en el tiempo. De esto planteamos las ecuaciones para un fluido. Las fuerzas a tomar en cuenta serán las fuerzas por gradiente de presión, gravedad, Coriolis, viscosidad y forzantes.

$$\frac{D\vec{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \vec{g} - 2\vec{\Omega} \times \vec{v} + \vec{F} \quad (\text{D.7})$$

Coriolis Esta fuerza sale al referenciar un sistema no-inercial a uno inercial. Como la Tierra es un sistema en rotación, al referenciarlo a un sistema inercial vemos el efecto que la rotación tiene sobre los objetos que están en la Tierra.

La segunda ley de Newton nos muestra que las variaciones de momentum son equivalentes a la suma de fuerzas sobre el objeto en estudio, esto último en un sistema inercial. Pero si el sistema de referencia está bajo una aceleración (sistema no inercial), debemos realizar una transformación de coordenadas, donde esta nueva transformación nos lleve a un sistema inercial.

$$\begin{aligned} \sum \vec{F} &= m\vec{a}_i = m \left(\frac{d\vec{v}}{dt} + a_{ni} \right) \\ \sum \vec{F} - ma_{ni} &= m \frac{dv_{ni}}{dt} \end{aligned}$$

De esta última ecuación se ve que la segunda ley de Newton puede ser utilizada para este caso realizando una pequeña corrección en el lado derecho de la ecuación.

Siguiendo la idea anterior suponemos un sistema de referencia no inercial el cual bajo un sistema de referencia inercial posee una rotación angular $\vec{\Omega}$ y está a una distancia \vec{R} . Si tenemos una partícula en el sistema no inercial a una distancia \vec{r} de este, diremos que la distancia al sistema inercial de esta partícula es

$$\vec{d}_i = \vec{r} + \vec{R}$$

Si la ecuación anterior es derivada con respecto al tiempo tendremos derivar como 3 termino

$$\vec{v}_i = \vec{v}_{ni} + \frac{d\vec{R}}{dt} + \vec{\Omega} \times \vec{r}$$

Y derivando una tercera vez tendremos

$$\vec{a}_i = \frac{dv_{ni}^{\vec{r}}}{dt} + \frac{d^2\vec{R}}{dt^2} + \frac{d\vec{\Omega}}{dt} \times \vec{r} + 2\vec{\Omega} \times v_{ni}^{\vec{r}} + \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r}) \quad (\text{D.8})$$

Índice de figuras

1.1. Esquema de la surgencia costera en el Hemisferio Sur	3
1.2. Espiral de Ekman, donde puede apreciarse como el ángulo de la velocidad va cambiando con la profundidad según las ecuaciones 1.1 y 1.2	4
2.1. Distribución de las Capas Sigma. La configuración para esta distribución es de 32 capas sigmas, $\theta_s = 6.0$ y $\theta_b = 0.0$. La figura de la derecha es un acercamiento de la superficie. 11	11
2.2. Temperatura (arriba) y Salinidad (abajo) para el promedio mensual de enero del WOA 2005 en grados Celsius y psu respectivamente.	13
2.3. Campo de estrés de viento [N/m^2] para la superficie del océano junto con la transferencia de calor neto [W/m^2] para el primer mes (arriba) y el séptimo mes (abajo) del COADS. Los vectores del campo de estrés viento están representado por las flechas, mientras que la transferencia de calor neto está representado por los colores.	16
3.1. Gráficos de izquierda a derecha. Batimetría para la grilla de 5 km de resolución utilizando interpolación cúbica. La diferencia en la batimetría generada por una interpolación cúbica y una lineal. La diferencia entre la interpolación cúbica y del punto más cercano. La unidad utilizada para todos los gráficos anteriores fue el metro.	18
3.2. De izquierda a derecha. Gráfico de la batimetría en metros para la región en estudio en la base de datos GEBCO. Gráfico de la diferencia de las batimetría interpoladas de las bases de datos GEBCO y ETOPO	20

- 3.3. Gráficos de las distintas líneas de costas utilizadas para los cálculos de las grillas de 5 km (superior) y 10 km (inferior). De izquierda a derecha tenemos la línea de costa original, costa retocada con detalles y costa suavizada 22
- 3.4. Tiempo necesario para realizar 100 pasos de simulación con distinto número de procesos para la interfase MPI (círculo) y distinto número de hilos para la interfase OpenMP (diamante) 23
- 3.5. Gráficos de Estabilidad de la Simulación **20.Original.ETOPO**. La línea roja son el promedio partiendo desde el segundo año de simulación, ya que para este año la energía cinética alcanza la estabilidad. 27
- 3.6. Serie de promedios diarios de los datos de temperatura superficial de la base de datos OSTIA en el periodo de tiempo comprendido entre Abril del año 2006 y Marzo del año 2009. El gráfico inferior muestra un promedio de la temperatura superficial diario para los últimos diez años obtenidos de la simulación 29
- 3.7. Desde la izquierda a la derecha. Temperatura en la última capa sigma (superficie) para el primer día del año 8 de simulación. los siguientes tres gráficos corresponden a los datos OSTIA para el primer día de los años 2007, 2008 y 2009 correspondientemente. 30
- 3.8. Los gráficos de la fila superior corresponden al promedio de temperatura superficial para los meses de Enero (2007-2009), Abril(2006-2008), Julio(2006-2008) y Octubre(2006-2008). La fila inferior contiene gráficos con el promedio de temperatura para la capa sigma mas cercana a la superficie para los últimos 10 años de cálculo, correspondiente a los meses 1 , 4, 7, y 10 . 31
- 3.9. Historigramas de las simulaciones **20.Original.ETOPO**, **20.Detallada.ETOPO**, **20.Suavizada.ETOPO**, **20.Original.GEBCO** y **10.Original.ETOPO**, desde arriba hacia abajo correspondientemente, junto a la línea de costa chilena (línea roja) . . . 33
- 3.10. Historigramas de las simulaciones **20.Original.ETOPO**, **20.Detallada.ETOPO**, **20.Suavizada.ETOPO**, **20.Original.GEBCO** y **10.Original.ETOPO**, desde arriba hacia abajo correspondientemente indicando en que periodo del año se presentaban 35

3.11. Resultados de temperatura superficial con 10 kilómetros una resolución pra las configuraciones 10.Detallada.ETOPO , 10.Original.ETOPO , 10.Suavizada.ETOPO y 10.Original.GEBCO , de izquierda a derecha correspondientemente. Los datos expuestos corresponden al día 16 del primer mes del octavo año	36
3.12. Resultados de temperatura superficial con 5 kilómetros una resolución pra las configuraciones 20.Detallada.ETOPO , 20.Original.ETOPO , 20.Suavizada.ETOPO y 20.Original.GEBCO , de izquierda a derecha correspondientemente. Los datos expuestos corresponden al día 16 del primer mes del octavo año	37
3.13. Resultados de velocidades superficiales con 10 kilómetros una resolución pra las configuraciones 10.Detallada.ETOPO , 10.Original.ETOPO , 10.Suavizada.ETOPO y 10.Original.GEBCO , de izquierda a derecha correspondientemente. Los datos expuestos corresponden al día 16 del primer mes del octavo año	38
3.14. Resultados de velocidades superficiales con 5 kilómetros una resolución pra las configuraciones 20.Detallada.ETOPO , 20.Original.ETOPO , 20.Suavizada.ETOPO y 20.Original.GEBCO , de izquierda a derecha correspondientemente. Los datos expuestos corresponden al día 16 del primer mes del octavo año	39
3.15. Filamento presente en la simulación para el día 16 de primer mes del año 8. En colores puede observarse la temperatura en C°. Los vectores representan la velocidad y las isolineas representan la rapidez [m/s]	41
A.1. Diagrama de la Grilla Arakawa C	50
C.1. Esquema General del trabajo con la Interfase MPI	58
C.2. Esquema General del trabajo con la Interfase OpenMP	58

Índice de tablas

2.1. Descripción del Computador utilizado	8
2.3. Criterios para definir un filamento	8
2.4. Configuraciones Generales de las Simulaciones	10
2.5. Caracteres utilizados en el código de cada simulación	15
3.1. Características de las Simulaciones	25
B.1. Datos correspondientes a la simulación de 10 kilómetros de resolución, con la línea de costa Original y una batimetría interpolada de la base de datos ETOPO	51
B.3. Datos correspondientes a la simulación de 5 kilómetros de resolución, con la línea de costa Detallada y una batimetría interpolada de la base de datos ETOPO	52
B.5. Datos correspondientes a la simulación de 5 kilómetros de resolución, con la línea de costa Original y una batimetría interpolada de la base de datos ETOPO	53
B.7. Datos correspondientes a la simulación de 5 kilómetros de resolución, con la línea de costa Original y una batimetría interpolada de la base de datos GEBCO	54
B.9. Datos correspondientes a la simulación de 5 kilómetros de resolución, con la línea de costa Suavizada y una batimetría interpolada de la base de datos ETOPO	55

Bibliografía

- [Andrade and Barton, 2005] Andrade, C. A. and Barton, E. D. (2005). The guajira upwelling system. *Continental Shelf Research*, 25:1003–1022.
- [Batteen et al., 1995] Batteen, M. L., Hu, C.-P., Bacon, J. L., and Nelson, C. S. (1995). A numerical study of effects of wind forcing on the chile current system. *Journal of Oceanography*, 51:585 to 614.
- [Chapman et al., 2008] Chapman, B., Jost, G., and van der Pas, R. (2008). *Using OpenMP, Portable Shared Memory Parallel Programming*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts London, England.
- [Conkright et al., 2002] Conkright, M. E., Locarnini, R. A., Garcia, H. E., OâBrien, T. D., Boyer, T. P., Stephens, C., and Antonov, J. I. (2002). World ocean atlas 2001: objetive analyses, data statistics, and figures, cd-rom documentation. Technical report, Ocean Climate Laboratory, National Oceanographic Data Center, Silver Spring, MD.
- [Cushman-Roisin and Beckers, 2009] Cushman-Roisin, B. and Beckers, J.-M. (2009). *Introduction to Geophysical Fluid Dinamics, Physical and Numerical Aspects*. Under Contract with Academic Press.
- [Fisheries and Aquaculture Department, 2006] Fisheries and Aquaculture Department (2006). The state of world fisheries and aquaculture 2006. Technical report, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [Fisheries and Aquaculture Department, 2008] Fisheries and Aquaculture Department (2008). The state of world fisheries and aquaculture 2008. Technical report, Food and Agriculture Organization of the United Nations.

- [Flament et al., 1985] Flament, P., Armi, L., and Washburn, L. (1985). The evolving structure of an upwelling filament. *Journal of Geophysical Research*, 90(C6):11765–11778.
- [Grob et al., 2003] Grob, C., Quiñones, R. A., and Figueroa, D. (2003). Cuantificación del transporte de agua costa-oceano a través de filamentos y remolinos ricos en clorofila a, en la zona centro-sur de Chile (35.56-37.5s). *Gayana*, 67(1):55–67.
- [Lutjeharms et al., 1991] Lutjeharms, J. R. E., Shillington, F. A., and Rae, C. M. D. (1991). Observations of extreme upwelling filaments in the south-east Atlantic ocean. *Science*, 253(5021).
- [Marchesiello et al., 2001] Marchesiello, P., McWilliams, J., and Shchepetkin, A. (2001). Open boundary conditions for long-term integration of regional oceanic models. *Ocean Modelling*.
- [Orlanski, 1976] Orlanski, I. (1976). A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows. *Journal Comp. Phys.*, (21):251–269.
- [Penven et al., 2007] Penven, P., Marchesiello, P., Debreu, L., and Lefèvre, J. (2007). Software tools for pre- and post-processing of oceanic regional simulations. *Environmental Modelling & Software*.
- [Raymond and Kuo, 1984] Raymond, W. H. and Kuo, H. (1984). A radiation boundary condition for multi-dimensional flows. *Quart. J. R. Met. Soc.*, (110):535–551.
- [Sánchez et al., 2008] Sánchez, R., Relvas, P., Martinho, A., and Miller, P. (2008). Physical description of an upwelling filament west of Cape St. Vincent in late October 2004. *Journal of Geophysical Research*, 113.
- [Sepúlveda, 2008] Sepúlveda, H. (2008). Numerical modeling of upwelling filaments in northern Chile (19-30°S) and implications for larval transport. Technical report, CONICYT.
- [Silva et al., 1994] Silva, A. D., Young, C., and Levitus, S. (1994). Atlas of surface marine data 1994. vol. 1: Algorithms and procedures. Technical report, NOAA Atlas NESDIS 6. U.S. Government Printing Office, Wash., D.C.
- [Smith and Sandwell, 1997] Smith, W. H. F. and Sandwell, D. T. (1997). Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science*, 227.

- [Sobarzo and Figueroa, 2001] 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.
- [Sommerfeld, 1949] Sommerfeld, A. (1949). Partial differential equations. lecture notes on theoretical physics. *Academic Press, San Diego, CA.*, 6.
- [Strub et al., 1998] Strub, P. T., Mesias, J. M., Montecino B., V., Rutllant C., J., and Salinas M., S. (1998). Coastal ocean circulation off western south america. *The Sea*, 11:273–313.
- [Webpage de ROMS,] Webpage de ROMS. Wiki ROMS.