

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

TESIS DOCTORAL

**PATRONES DE CIRCULACIÓN OCEÁNICA EN EL
LITORAL ESPAÑOL**

Presentada por: MARÍA LISTE MUÑOZ

**Dirigida por: RAÚL MEDINA SANTAMARÍA
MAITANE OLABARRIETA LIZASO
ALICIA LAVÍN MONTERO**

Junio 2009

CAPÍTULO III:

Puesta a punto del Modelo y descripción del Modelo MEDiNA

A lo largo de los capítulos 1 y 2 de ésta Tesis, donde se describe exhaustivamente el estado del conocimiento actual, así como los objetivos propuestos y el modelo numérico seleccionado para llevar a cabo dichos objetivos, se ha hecho notoria la necesidad de una puesta a punto del modelo numérico, con el fin de que éste sea adecuado y específico para la zona de estudio.

Por tanto, el principal objetivo de este capítulo es describir las implementaciones realizadas al modelo *DieCAST*, para su puesta a punto en la zona de estudio, así como la descripción del nuevo modelo generado a partir de dichas implementaciones, el Modelo *MEDiNA*.

Para ello, este capítulo se estructura en diversos apartados de forma que el primer apartado se dedica a la introducción, donde se argumentan las razones por las cuales es necesaria una puesta a punto del modelo para la zona de estudio. En el segundo apartado se presenta el modelo resultante, el Modelo *MEDiNA*. Este modelo surge tras las implementaciones que se han realizado al modelo oceánico de circulación *DieCAST*, en lo que se refiere a la forma en que el modelo se ejecuta, el dominio de estudio, a la condición inicial utilizada, a las condiciones de contorno impuestas, los forzamientos utilizados, etc. Por último, en el tercer apartado se hace un resumen y se exponen las conclusiones de este capítulo.

3.1 Introducción

El Modelo *DieCAST* es un modelo adecuado para realizar simulaciones de gran escala ya que se ha utilizado en diversos estudios, e implementado y validado para su uso en la simulación de campos de corrientes para dominios extensos en diferentes regiones. Esto, unido a su baja difusión numérica, lo hace adecuado para un estudio de las características de esta Tesis, simulaciones de gran escala y prolongado tiempo de simulación (46 años).

Es ante la imposibilidad de resolver el Modelo *DieCAST* en una sola malla (dado el extenso dominio de estudio), por lo que surge el Modelo *MEDiNA*. A continuación, se presentan de manera resumida, las características generales del Modelo *MEDiNA*.

3.1.1. Descripción del Modelo MEDiNA

El modelo utilizado para realizar las simulaciones en esta Tesis es finalmente, el Modelo *MEDiNA* (**M**editerranean and **N**orth Atlantic Model). Es un modelo numérico tridimensional de escala oceánica en diferencias finitas, que surge a partir de la implementación del Modelo *DieCAST* (*Dietrich et al., 1987; Dietrich, 1997*), ante la necesidad de acoplar las diversas zonas que influyen en la circulación del Golfo de Vizcaya: el Mar Mediterráneo y el Atlántico Norte (Figura 3.1).

Como su antecesor, el modelo *MEDiNA* resuelve el movimiento del flujo, tanto la componente barotrópica como la baroclínica, incluyendo los efectos de la aceleración de Coriolis, la variación de la temperatura por absorción de radiación solar y por emisión a la atmósfera, la variación de la salinidad y el efecto de la tensión tangencial en superficie por la acción del viento. Como resultado, el modelo *MEDiNA* proporciona series temporales de salinidad, temperatura y velocidad (componentes vertical y horizontal).

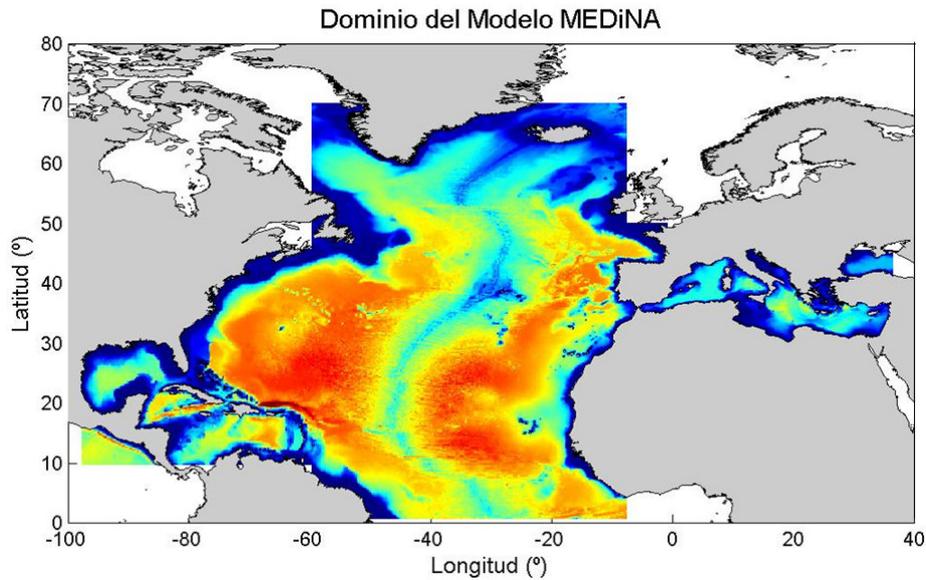


Figura 3.1. Dominio de estudio del Modelo MEDiNA.

3.2 Puesta a punto del modelo

3.2.1. Batimetría

La batimetría que se ha utilizado para generar las mallas en el Modelo MEDiNA, proviene de la base de datos ETOPO2. Esta, es una base de datos digital de la topografía terrestre y la batimetría del fondo del mar y tiene una resolución espacial de 2 minutos, tanto en longitud como en latitud. El motivo por el que se ha escogido esta base de datos para generar las mallas del Modelo MEDiNA, ha sido porque es una base de datos que abarca desde 90° N hasta 89°58' S en latitud y desde 180° W hasta 189°58' E en longitud, con 2 minutos de resolución.

Se ha realizado a partir de la recopilación de diferentes bases de datos de US Naval Oceanographic Office; USA., W. Europe, Japan/Korea: US Defense Mapping Agency; Australia: Bureau of Mineral Resources, Australia; New Zealand: Department of Industrial and Scientific Research, New Zealand; balance of world land masses: US Navy Fleet Numerical Oceanographic Center. En la figura 3.2, se muestra una imagen de la batimetría y la topografía utilizada por el modelo MEDiNA.

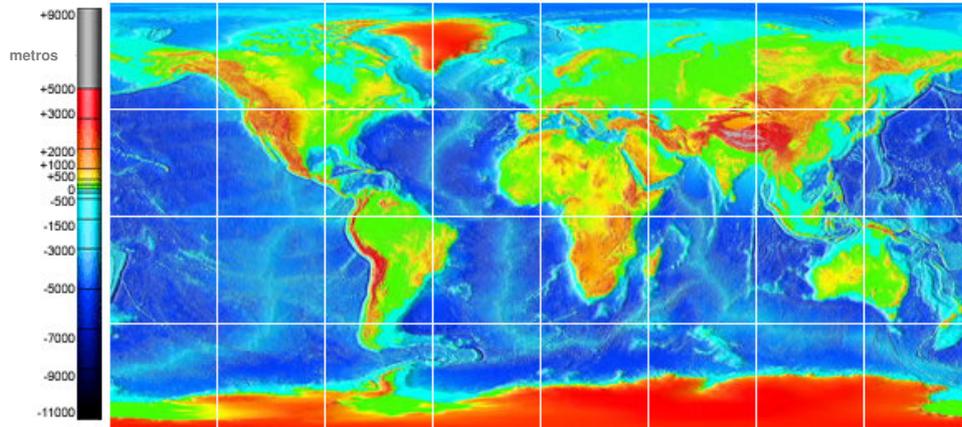


Figura 3.2. Imagen de la topografía y la batimetría ETOPO 2, utilizada para generar las mallas del modelo MEDiNA. (Fuente: National Geophysical Data Center (NGDC). NOAA, Satellite and International Service).

3.2.2. Mallas

Ante la imposibilidad de resolver el modelo en una sola malla (dado el extenso dominio del estudio), se ha dividido el área de estudio en 6 mallas que abarcan las zonas comprendidas entre el Golfo de México y el Mar Mediterráneo (Figura 3.3). Las batimetrías para cada una de las mallas han sido interpoladas (cada una con su resolución), a partir de los datos proporcionados por ETOPO2.

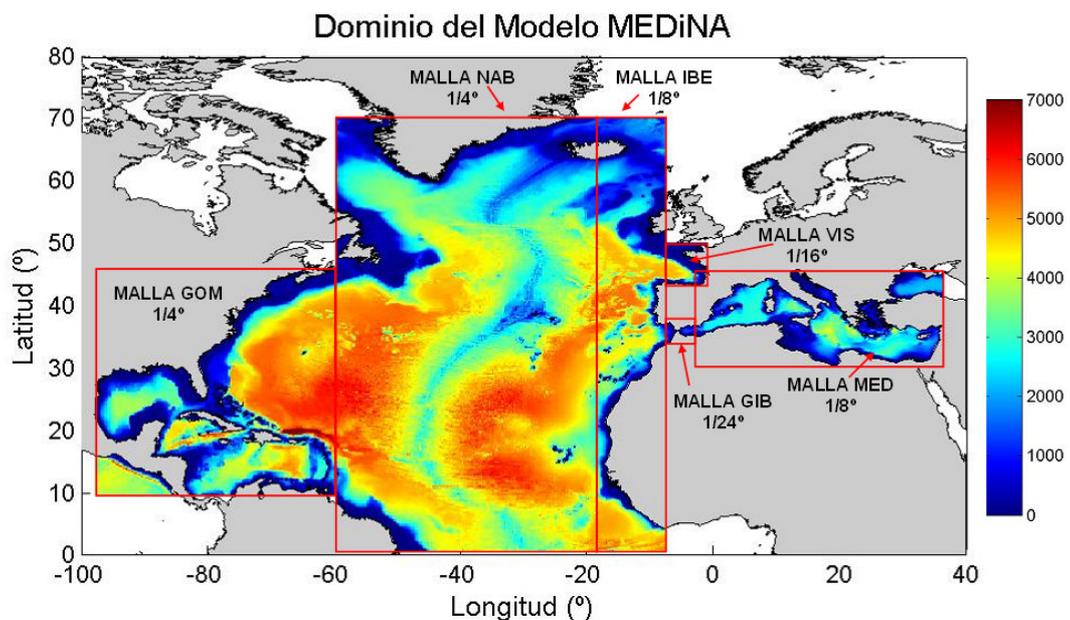


Figura 3.3. Mallas del Modelo MEDiNA sobre la batimetría ETOPO2 (m de profundidad), de la zona de estudio.

Todas las mallas presentan la misma resolución vertical, 30 niveles o capas de profundidad, cuya profundidad en el centro de la capa y espesor de la capa, se muestra a continuación (tabla 3.1):

Capa	Profundidad en el centro de la capa (m)	Espesor	Capa	Profundidad en el centro de la capa (m)	Espesor
1	5	10	16	429,85	60,9
2	15,93	11,86	17	493,96	67,32
3	28,23	12,74	18	566,1	76,96
4	42,06	14,92	19	647,27	85,38
5	57,63	16,22	20	738,6	97,28
6	75,15	18,82	21	841,36	108,24
7	94,86	20,6	22	956,99	123,02
8	117,04	23,76	23	1087,09	137,18
9	142	26,16	24	1233,48	155,6
10	170,08	30	25	1398,19	173,82
11	201,67	33,18	26	1583,52	196,84
12	237,22	37,92	27	1792,06	220,24
13	277,22	42,08	28	2026,69	249,02
14	322,23	47,94	29	2290,7	279
15	372,8	53,2	30	2587,76	315,12

Tabla 3.1. Profundidad en el centro de la capa y espesor de la capa, de los 30 niveles verticales, que conforman cada una de las mallas del modelo MEDiNA.

La resolución horizontal en cada malla también es diferente. Las características de cada una de ellas se detallan a continuación:

- Malla del Golfo de México (GOM)
 - Resolución horizontal de $\frac{1}{4}$ de grado ($\approx 27,83 \text{ Km}$).
- Malla del Atlántico Norte (NAB).
 - Resolución horizontal de $\frac{1}{4}$ de grado ($\approx 27,83 \text{ Km}$).
- Malla de la Península Ibérica, Noroeste de África e Islas Canarias (IBE).
 - Resolución horizontal de $\frac{1}{8}$ de grado ($\approx 13,92 \text{ Km}$).
- Malla del Golfo de Vizcaya (VIS).
 - Resolución horizontal de $\frac{1}{16}$ de grado ($\approx 6,96 \text{ Km}$).
- Malla del Estrecho de Gibraltar (GIB).
 - Resolución horizontal de $\frac{1}{24}$ de grado ($\approx 4,64 \text{ Km}$).
- Malla del Mar Mediterráneo (MED).
 - Resolución horizontal de $\frac{1}{8}$ de grado ($\approx 13,92 \text{ Km}$).

3.2.2.1. Anidamiento entre Mallas

Una de las principales características del modelo MEDiNA es cómo se realiza la unión o anidamiento entre las diferentes mallas del dominio.

El principal objetivo de un anidamiento entre mallas en los modelos oceánicos de circulación, es incrementar la resolución en una región concreta del dominio; de esta manera, se resuelven los efectos de escala sin tener un excesivo gasto computacional, como el que se tendría calculando todo el dominio con la misma resolución para todas las mallas (Fox y Maskell, 1995).

Un anidamiento consiste en la unión entre una malla con un resolución pequeña y una malla con un resolución más grande, que se intercambian frecuentemente información mediante una zona estrecha (e.g. Kurihara et al., 1979), donde ambas mallas se solapan (Figura 3.4).

En esta Tesis, se utiliza la técnica del “*anidamiento en doble sentido*”, basada en el método del semipronóstico (Sheng J., et al., 2004, *Dietrich, et al., 2004b*). La principal característica de esta técnica es que las mallas que se encuentran anidadas, se ven afectadas entre si.

El método del semipronóstico (figura 3.4), se aplica de modo que en primer lugar, las variables que se desean calcular (velocidad, temperatura, salinidad, etc), se interpolan de la malla de menor resolución, a la de mayor resolución. De esta forma, se proporciona a la malla de mayor resolución, unos valores iniciales con los que poder empezar a ejecutar. En segundo lugar, el modelo calcula el “*coeficiente de anidamiento*” (concentración de datos próximos a la zona de interpolación), en la zona donde las dos mallas se superponen, y se interpola a la malla con menor resolución; a continuación, se ajustan las ecuaciones del momento dentro de la malla de menor resolución, y sus resultados se interpolan a la malla de mayor resolución.

ORGANIGRAMA

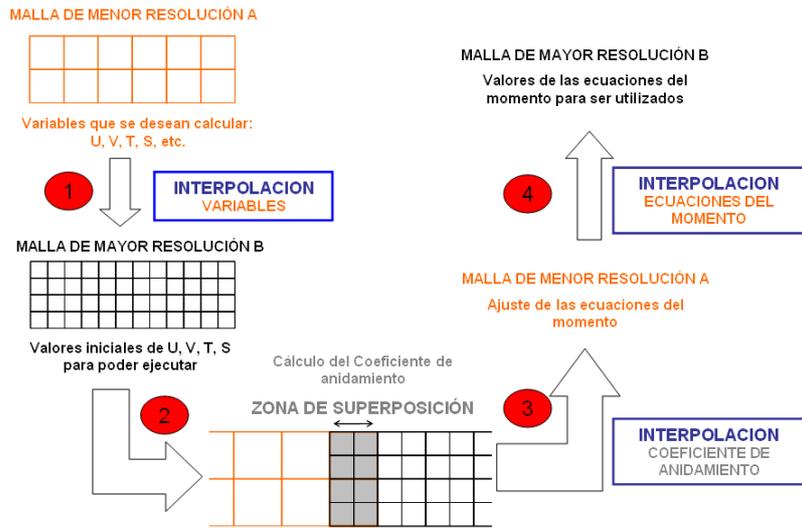


Figura 3.4. Organigrama del método del semipronóstico.

A continuación, se describe cómo se anidan las mallas en el modelo y como se intercambian los datos entre ellas. En la figura 3.5, se muestra el anidamiento entre dos mallas de diferente resolución. La malla B (color negro), presenta mayor resolución que la malla A (color naranja).

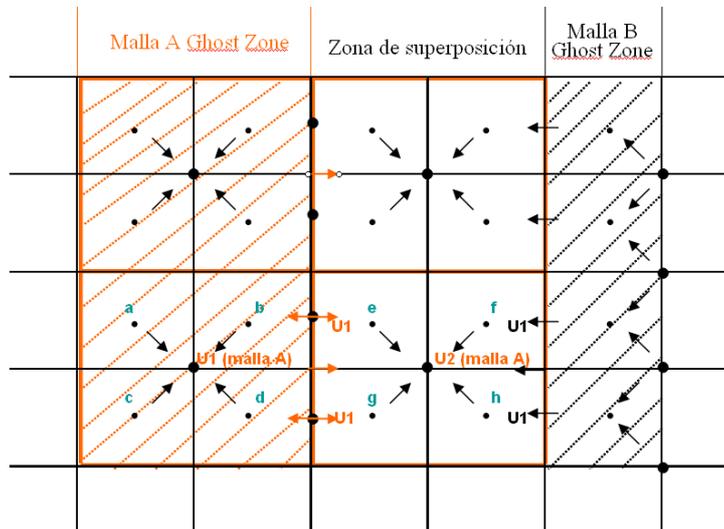


Figura 3.5. Ejemplo de anidamiento entre dos mallas.

En primer lugar se calculan todas las variables en la malla A, y se pasan a la malla B. La malla B calcula sus variables y las pasa a la zona de superposición de las dos mallas.

Las variables como la temperatura $T2$, la salinidad $S2$ y la velocidad final $U2$, se calculan en el centro de las celdas, mientras que la velocidad *estimada* $U1$, se pasa a través de la cara de las celdas.

A continuación, la malla A pasa de la misma forma sus variables al centro de las celdas de la zona de superposición. $U1$ (malla A) y $U2$ (malla A), se calculan a partir del promedio entre los puntos a, b, c y d y e, f, g y h , respectivamente.

Dentro de la zona de superposición se corrigen todas las variables y mediante un esquema tipo “*up-wind*”, se advectan en una u otra dirección de la malla dependiendo del signo de la velocidad.

3.2.3. Condición Inicial

A lo largo del Capítulo I de ésta Tesis, se ha puesto de manifiesto cómo la temperatura o la salinidad, desempeñan un importante papel en la circulación oceánica debido a la capacidad del océano para absorber calor en determinados lugares, transportarlo largas distancias y devolverlo más tarde a la atmósfera. Se hace necesario por tanto, para poder comprender y predecir con la mayor exactitud posible la circulación oceánica, que los modelos oceánicos incluyan dichas variables.

El Modelo *MEDiNA*, necesita una serie de condiciones iniciales de velocidad, temperatura y salinidad. En cuanto a la velocidad se refiere, se asume que ésta es cero en el instante inicial de la simulación.

La Temperatura y la Salinidad se definen a través de una base de datos climatológicos, que proporciona la media mensual y anual de cada una de estas variables.

3.2.3.1. Bases de datos de los campos de temperatura y salinidad

Es esencial para iniciar cualquier modelo oceánico, conocer la temperatura y la salinidad predominantes durante el periodo de tiempo que se pretende simular

ejecutando el modelo. Desafortunadamente, es muy costoso recopilar datos de masas de agua en el océano, principalmente en lo que se refiere a las masas de agua de la parte profunda de las cuencas. Sin embargo estas masas de agua cambian lentamente, en escalas de tiempo de cientos de años (Kuhlbrodt et al., 2007), y se pueden considerar casi constantes. Por lo tanto, se puede recurrir a las bases de datos históricas para extraer los datos con los que se puede iniciar los modelos, en este caso, campos de temperatura y salinidad.

En esta Tesis se han utilizado dos bases de datos diferentes para proveer al modelo de campos de temperatura y salinidad. La primera de ellas, *World Ocean Atlas* (WOA), que se ha utilizado para proporcionar datos en todo el Atlántico Norte (dominio comprendido por las mallas, NAB, GOM, IBE y VIS), mientras que la segunda base de datos *Mediterranean Data Archaeology and Rescue* (MEDAR-MEDATLAS), se ha utilizado para proporcionar datos en el Estrecho de Gibraltar y el Mar Mediterráneo (dominio comprendido entre las mallas GIB y MED). A continuación se describen ambas bases de datos.

World Ocean Atlas (WOA), es una base de datos realizada por el Ocean Climate Laboratory del National Oceanographic Center, perteneciente a la NOAA, que consiste en campos de climatología *in situ* de parámetros oceanográficas como pueden ser la temperatura y la salinidad, de todos los océanos del mundo (Figura 3.6).

Esta base de datos se realizó por primera vez en 1994, se basa en anteriores Atlas Climatológicos y se presenta en ediciones aproximadamente cada 4 años, 1998, 2001 y 2005. Antes de su divulgación, se ha demostrado que la base de datos es de gran utilidad para los estudios oceanográficos, las investigaciones sobre el clima y la predicción operacional. Se ha utilizado tanto en contornos y/o condiciones iniciales de modelos numéricos de circulación oceánica, como en modelos de interacción atmósfera-océano, para verificar las simulaciones numéricas oceánicas como una forma de “mar original verdadero” (Locarnini et al., 2006; Antonov et al., 2006).

La parte del WOA que hace referencia a la temperatura y la salinidad, consta de una descripción de los procedimientos seguidos para el análisis de los datos y mapas horizontales climatológicos anuales, estacionales y mensuales de campos de

distribución de temperatura y de salinidad en niveles de profundidad estándar (31), para todos los océanos del mundo, en una malla de un grado de latitud-longitud. En estos mapas se ilustran las características de gran escala de la distribución de la temperatura y la salinidad oceánica.

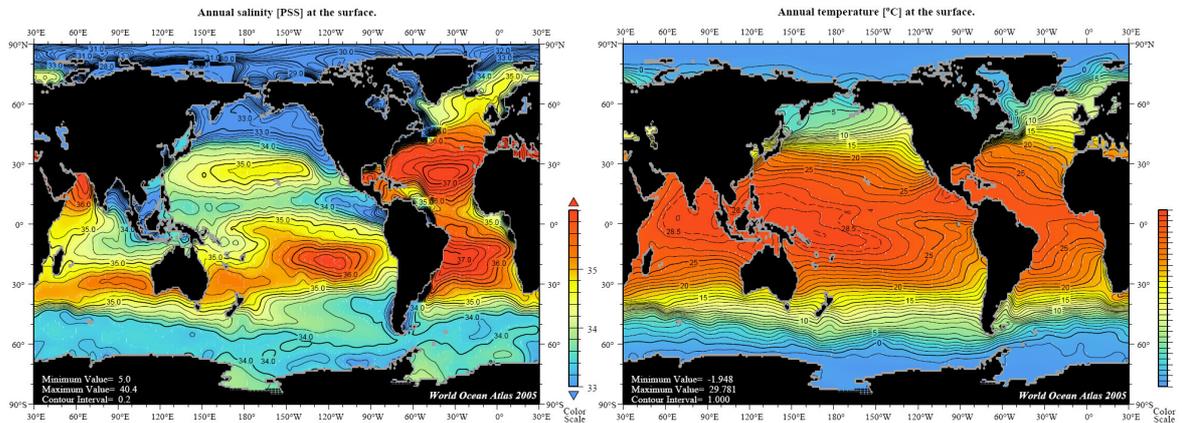


Figura 3.6. Gráficas de Salinidad y Temperatura superficial extraídas de la base de datos WOA 2005.

Aplicando un procedimiento de interpolación a los campos de las variables utilizadas denominado, *Análisis Objetivo* (Bretherton et al., 1976), se obtuvieron mapas climatológicos de perfiles históricos de temperatura y salinidad (solo los datos superficiales). Un perfil se define como un conjunto de medidas de una sola variable (temperatura, salinidad, etc.....) en profundidades constantes, tomadas por un instrumento que cae o se eleva verticalmente en la columna de agua.

Las climatologías resultantes se han definido como medias oceanográficas de los campos seleccionados, con unos niveles de profundidad estándar. Para calcular dichas climatologías se han utilizado todos los datos disponibles, independientemente del año de observación.

La climatología anual se ha calculado utilizando todos los datos independientemente del mes en el que se hicieron las observaciones. Las climatologías estacionales se calcularon utilizando sólo los datos de la estación a la que se refiere (independientemente del año).

Las estaciones se definen de la siguiente manera. Se considera invierno los meses de Enero, Febrero y Marzo, primavera, Abril, Mayo y Junio, verano los meses de Julio, Agosto y Septiembre y otoño Octubre, Noviembre y Diciembre. Las climatologías mensuales se calcularon utilizando los datos de día del mes, en que se hizo la observación.

Los datos utilizados de temperatura y salinidad están disponibles en el *National Oceanographic Data Center* (NODC), así como en el *World Data Center* (WDC), y ha sido el resultado de la realización de diversos proyectos (*The Intergovernmental Oceanographic Commission* (IOC), *Global Oceanographic Data Archaeology and Rescue* (GODAR), *Levitus Project* y *The IOC World Ocean Database project* (WOD)).

MEDAR-MEDATLAS, es una base de datos de diversos parámetros oceanográficos que surgió a partir de un proyecto encargado por la UNESCO (*International Oceanographic Data and Information Exchange* (IODE) y la *Intergovernmental Oceanographic Commission* (IOC)). Dicho proyecto se realizó a través de una amplia cooperación entre la mayoría de los países de la cuenca Mediterránea y del Mar Negro (Figura 3.7), para poner a disposición datos hidrográficos y biogeoquímicos in-situ de dichas zonas. Actualmente el organismo encargado de proporcionar todos los parámetros de la base de datos es IFREMER (*Institut Français de Recherche pour L'exploitation de la Mer*).

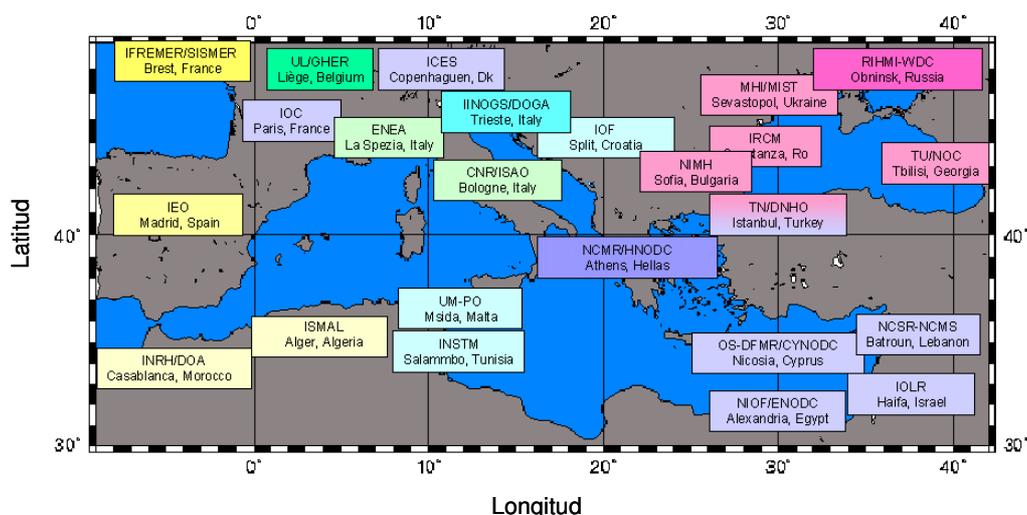


Figura 3.7. Países participantes en el proyecto MEDAR-MEDATLAS 2002 (Fuente: Ifremer).

MEDAR-MEDATLAS, contiene la práctica totalidad de los perfiles hidrográficos obtenidos en el Mediterráneo durante el siglo *XX*, y contiene entre otros muchos parámetros, campos de climatología *in situ* de temperatura y salinidad para todo el Mediterráneo incluyendo zonas de detalle como el Mar de Alborán, el Estrecho de Sicilia, el Mar Balear, o el Golfo de León. Esta base de datos se finalizó en 2002 y se trata de la fuente de datos más completa para el estudio de la variabilidad de la temperatura o salinidad que existe para el Mar Mediterráneo.

La parte del *MEDAR-MEDATLAS* que hace referencia a los parámetros de temperatura y salinidad, consta de una descripción de los procedimientos seguidos para el análisis de los datos y mapas horizontales climatológicos, estacionales y mensuales de campos de distribución de temperatura y de salinidad en niveles de profundidad estándar (25), tanto para el Mar Mediterráneo como para el Mar Negro, en una malla de 1/5° grado de latitud-longitud (Figura 3.8).

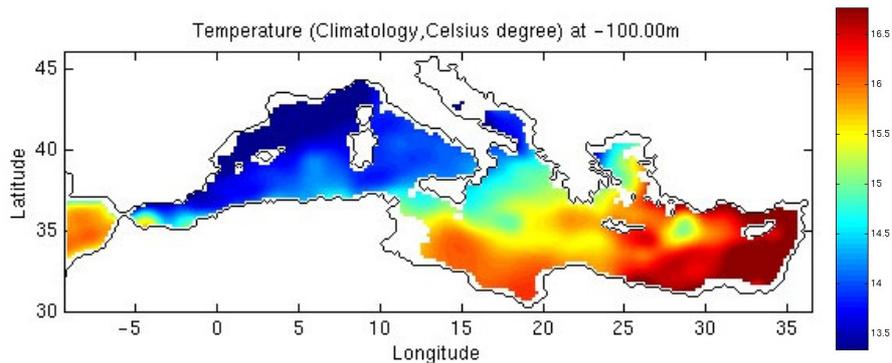


Figura 3.8. Ejemplo de la temperatura a 100 m de profundidad en la malla del Mar Mediterráneo.

Todos los datos que se han utilizado (por ejemplo para la obtención de climatologías), han sido estudiados por expertos de cada región que comprende el dominio y se han sometido a exhaustivos controles de calidad. En lugar de utilizar el clásico sistema de *Análisis Objetivo*, (Bretherton et al., 1976), los campos se han calculado utilizando el *Modelo de Variación Inversa* que es estadísticamente equivalente al *Análisis Objetivo* (Rixen et al., 2000).

Los datos utilizados de temperatura y salinidad están en formato NetCDF y se encuentran disponibles en <http://www.ifremer.fr/medar>.

3.2.4. Forzamientos

Los vientos que soplan sobre la superficie constituyen una importante fuerza motriz para las corrientes oceánicas, al igual que los flujos de calor, o los procesos de evaporación y precipitación. Todos ellos desempeñan un papel crucial en la circulación oceánica y por eso, se hace necesario incluirlos como parámetros forzadores en los modelos oceánicos.

3.2.4.1. Tensión Tangencial en Superficie

Los vientos superficiales utilizados como forzamientos en esta Tesis, se han extraído de las medias mensuales de la base de datos Hellerman (Hellerman y Rosenstein, 1983), proporcionada por *Goddard Space Flight Center* (<http://www.gsfc.nasa.gov/>).

Dado que los vientos presentan una gran diversidad de escalas, que van desde la horaria a la anual, es muy difícil obtener información completa de viento en todas las escalas espaciales y temporales del océano. Aunque los modelos de predicción numérica, son una importante fuente de vientos sinópticos, son imperfectos. De igual manera, los sensores remotos y altímetros con radar que miden la rugosidad inducida por el viento de la superficie del océano, podrían ser otra importante fuente de datos pero infieren en la fuerza del viento actuando en la superficie. Para escalas de tiempo largas, las observaciones realizadas por los barcos de la superficie marina son la fuente de datos más importante y completa.

Hellerman y Rosenstein (1983), recogieron y archivaron más de 35 millones de observaciones de la superficie del océano disponibles entre 1870 y 1976. Realizaron medias de largo plazo de varias décadas y las incorporaron a una base de datos histórica de cobertura global. Esta base de datos contiene un promedio mensual de la tensión superficial del viento (dinas/cm^2) sobre todo el océano, con una resolución espacial de 2 grados tanto en longitud como en latitud.

La fuerza del viento sobre el océano suele calcularse en función de la densidad (del aire o del agua), el coeficiente de arrastre y la velocidad del viento. Hellerman y Rosenstein (1983), utilizaron la siguiente ecuación (ecuación 3.1):

$$\tau = \rho C_D (u^2 + v^2) \quad 3.1$$

donde τ , es la fuerza del viento, ρ , es la densidad del aire y u y v , son las componentes del viento a una altura de 10 m. El coeficiente de arrastre C_D , se toma como 0.8×10^{-3} para vientos menores de 6.7 m/s y 2.6×10^{-3} para vientos mayores de 6.7 m/s.

3.2.4.2. Flujos de Calor y de Agua Dulce

Tanto los flujos de calor como los de agua dulce en la superficie del océano, son importantes elementos forzadores de los modelos oceánicos y dependen principalmente de pequeñas diferencias de temperatura entre la atmósfera y el océano, así como de la diferencia de salinidad. Esto hace que sea prácticamente imposible obtener datos de dichos parámetros en un amplio dominio, con la precisión y la cobertura requerida por un modelo oceánico.

Por dicha razón, se recurre al método de “restauración” de las condiciones de contorno superficiales, como método para introducir los forzamientos de los flujos de calor y agua dulce en el modelo.

La formulación utilizada para calcular tanto los flujos de calor como los de agua dulce es la propuesta por Fernández, V., (2004), y para los flujos de calor se expresa como sigue:

$$Q = \frac{\rho_0 C_p \delta z}{\lambda} (T^c - T) \quad 3.2$$

Donde ρ_0 , es la densidad y C_p , es la capacidad calorífica del agua, λ , es la constante de restauración, que determina por cuanto tiempo puede permanecer el valor

de Q , antes de que sea amortiguado o corregido. T^c , es la temperatura dada por la climatología, y T , es la temperatura obtenida por el modelo.

La salinidad superficial restaurada se puede expresar como:

$$E - P - R = \frac{\delta z}{\lambda} \left(\frac{S^c - S}{S} \right) \quad 3.3$$

Donde E , es la evaporación, P , es la precipitación y R , es la escorrentía de los ríos, λ , es la constante de restauración, que determina por cuanto tiempo puede permanecer el valor del flujo de agua dulce. S^c , es la salinidad dada por la climatología y S , es la salinidad superficial dada por el modelo.

El modelo MEDiNA utiliza una constante de restauración $\lambda=90$ días. El modelo calcula los valores superficiales de temperatura y salinidad y al cabo de 90 días de ejecución, el modelo corrige a través de los valores de temperatura y salinidad dados por el modelo, los flujos de calor y de agua dulce.

Finalmente se debe señalar que se ha impuesto como condición, que el modelo utilice los mismos forzamientos repetidos cada año (“*año perpetuo*”), tanto para las climatologías de temperatura y salinidad como para los flujos de calor y agua dulce y las tensiones tangenciales en superficie (Fernandez et al., 2005; Fernández, V., 2004. Numerical Studies of the Mediterranean Sea Variability. Tesis doctoral, Universidad de las Islas Baleares).

3.2.5. Condiciones de contorno

El Modelo MEDiNA, impone una serie de condiciones de contorno al modelo, que se pueden resumir de la siguiente manera:

En el norte del dominio de estudio, se impone la existencia de una plataforma continental artificial que corta el circuito entre el Océano Ártico y el Atlántico Norte, además de fuentes de agua dulce a lo largo de todo el contorno septentrional.

Se impone como condición de contorno ecuatorial, una capa de absorción para que las propiedades de la temperatura y la salinidad se acerquen a las dadas por la climatología.

El fondo se encuentra aislado y como condición de contorno se impone el no deslizamiento.

3.2.6. Paralelización

El modelo MEDiNA divide el dominio de estudio en 6 mallas diferentes. A partir de este hecho diferencial, se demandan por parte del modelo, nuevos requerimientos de cómputo; esto, unido a la necesidad de una respuesta (resultados), en un tiempo razonablemente rápido, abre la posibilidad de paralelizar el código secuencial, ya que la división del modelo en mallas, permite que sea ejecutado en diferentes procesadores a la vez. Con el código del modelo MEDiNA en modo secuencial, se genera 1 año de resultado tras 5 días de ejecución.

La paralelización del código se ha realizado conjuntamente, con el Grupo de Arquitectura y Tecnología de Computadores de la Universidad de Cantabria. Las líneas principales de investigación y desarrollo en las que trabaja el grupo, se basan principalmente en el análisis, diseño, evaluación y programación de computadores y redes de interconexión de alto rendimiento; y en concreto, uno de los principales trabajos que dicho grupo desarrolla, es la programación eficiente de arquitecturas paralelas.

Para implementar el código, se han tenido en cuenta las zonas donde se efectúa la mayor carga de trabajo y se consume la mayor parte del tiempo de ejecución.

Como sistema operativo se ha utilizado Linux Debian 3.0r2 (inestable), y se ha usado la librería de funciones MPI (MPI: A Message-Passing Interface Standard Message Passing Interface Forum, 1995). Esta librería se basa en el paso de mensajes y se considera la forma más potente y aceptada para programar sistemas paralelos, ya que permite abstraer la gran cantidad de detalles que la programación paralela conlleva. Su

ventaja más inmediata es su implementación y portabilidad a una gran variedad de sistemas (máquinas con memoria compartida, redes de estaciones de trabajo, etc...).

Ejecutando un programa en MPI, cada procesador tiene una copia del código del modelo. Todos los procesadores comienzan a ejecutar el mismo listado del código, pero cada proceso ejecutará distintas sentencias del programa, mediante bifurcaciones introducidas basadas en el rango del proceso (el rango identifica a cada proceso). De esta forma, cada procesador ejecuta el mismo programa, pero hará diferentes cosas dependiendo del procesador donde se ejecuta.

El modelo en paralelo, se ha ejecutado en un cluster de arquitectura multi-computador de memoria distribuida. El multicomputador está basado en elementos HP, es un cluster HPC compuesto por nodos de HP. Está formado por:

- 1 Front-end o servidor HP Proliant DL 380 3º Generación bi-procesador.
- 15 nodos HP Proliant DL 145 1º Generación bi-procesador con AMD Opteron 248.
- 20 nodos HP Proliant DL 145 2º Generación bi-procesador con AMD Opteron 265 dual core.
- 6 nodos HP Proliant DL 145 2º Generación bi-procesador con AMD Opteron 275 dual core.
- 5 Switch GigaBit Ethernet (10/100/1000) de 24 puertos cada uno para gestión.
- 1 Switch Myrinet bi-canal a 2 Gbps por canal para comunicación paralela con 16 puertos.
- 1 Switch Infiniband bi-canal a 10 Gbps por canal para comunicación paralela con 24 puertos.
- 1 Sistema de gestión de consolas KVM + monitor TFT.

Las características generales de máquina, se detallan a continuación en la tabla 3.2:

Procesadores	Memoria	Almacenamiento	Otros
2 x 15 AMD Opteron a 2.2 GHz (g1) 2 (4) x 20 AMD Opteron a 1.8 GHz (g2) 2 (4) x 6 AMD Opteron a 2.2 GHz (g3)	Memoria principal: 4 x 15 GB PC2700 DDR1 SDRAM Memoria principal 8 x 20 GB PC3200 DDR1 SDRAM Memoria Cache: - L2: 1 MB x 2 x 15 - L2: 1 MB x 4 x 26 Memoria Principal: 8 GB x 26	Discos IDE 15 x 40 GB Disco S-ATA 26 x 80 GB	1 Unidad de DVD-ROM CD-RW ProLiant 100 Series Management Processor, supporting IPMI 1.5 x 15 1 PCI-X (64/133) spot x15 2 PCI-X x 20 1 PCI-Express x 24 1 PCI-100 x 20
2 x 1 Intel Xeon a 3.06 GHz con HyperThreading	SDRam - L1: 512 KB x 2 x 41 - L2: 1 MB x 2 x 41 Memoria Principal: 5 GB	Ultra3-based Smart Array 5i Plus 5 discos Ultra320 - 1 x 146 (3 part, 45 GB Sist) - 4 x 146 GB (LVM) en RAID 5	
TOTAL: 138 procs.	TOTAL: 273 GB	TOTAL: 3226 GB	

Tabla 3.2. Características generales del multiprocesador (Fuente: Manual del Usuario, 2008. Arquitectura y Tecnología de Computadores. Universidad de Cantabria)

La comunicación entre el PC local y el servidor se lleva a cabo mediante conexiones seguras ssh (secure shell). La conexión se realiza al servidor principal (front-end) del cluster.

El almacenamiento de datos se ha realizado en una bandeja de discos SATA (HP MSA20), con capacidad para almacenar 6 TB. Esta bandeja de datos está ubicada en los racks del cluster y es gestionada físicamente mediante un servidor dedicado y sus datos son exportados a la red a través de un sistema de ficheros distribuidos OpenAFS.

Mediante la paralelización del código del modelo MEDiNA, se ha conseguido reducir al mínimo el tiempo total de cómputo del modelo. Se genera 1 año de resultados en tan solo 2,5 días de ejecución, frente a los 5 días que tardaba la ejecución en secuencial.

A partir de esta paralelización, se pueden obtener y procesar resultados, en un espacio relativamente corto de tiempo. De esta forma, se pueden corregir posibles errores o calibrar parámetros de entrada al modelo con tan solo 2,5 días de diferencia, respecto a la ejecución.

3.2.7. Formato de almacenaje de los resultados

Por último, la puesta a punto del modelo concluye con la implementación del formato binario *NetCDF* (cuya extensión es *.nc*), para almacenar los datos generados por el modelo.

El formato que se ha utilizado para guardar los ficheros es el formato binario *NetCDF* (Network Common Data Form) y su extensión es *.nc*. *NetCDF* es un conjunto de archivos y software libre que describe de una manera estándar el formato de los datos, independiente de la máquina donde se hayan generado dichos datos, fomentando de esta forma una creación estandarizada y un acceso y uso compartido por la comunidad científica.

El motivo por el que se ha escogido esta forma de almacenar los datos, además de por todo lo anteriormente dicho, se debe a su gran versatilidad que, unida a la capacidad que estos ficheros tienen de incluir gran cantidad de meta-información, hacen que sean ficheros prácticamente autosuficientes ya que ellos mismos abarcan toda la información necesaria para leer las variables que contienen. Este formato ha sido desarrollado por Unidata Program at the University Corporation for Atmospheric Research, UCAR, (<http://www.unidata.ucar.edu/>).

Todos los resultados se almacenarán en ficheros que contengan información mensual. Por un lado, se archivarán todos los datos de la capa superficial de cada una de las mallas con una resolución temporal de 6 horas, y por otro lado, se guardarán todos los datos en todos los niveles de profundidad para cada una de las mallas (30 niveles), con una resolución temporal de 5 días (medias cada 5 días de cada una de las variables).

3.3 Resumen y conclusiones

Una vez finalizado el Capítulo 3, donde se describe el modelo utilizado para generar los resultados de esta Tesis, así como las implementaciones realizadas para la

puesta a punto del mismo, se pueden resumir las principales aportaciones de los trabajos realizados de la siguiente manera.

Cabe destacar en primer lugar, que se han generado 6 mallas para ejecutar el modelo. Estas mallas tienen diferente resolución y se han interpolado al dominio de estudio del modelo, desde la batimetría proporcionada por la base de datos ETOPO2.

Una de las aportaciones más importantes en la puesta a punto del modelo MEDiNA, es la realización de un algoritmo de “*anidamiento en doble sentido*” (basado en el método del “*semipronóstico*”), para unir las mallas, cuya característica más notable es el intercambio de datos en ambas direcciones de anidamiento; de esta forma, las mallas que se encuentran anidadas, se ven afectadas entre sí.

En lo que se refiere a la puesta a punto de la Condición Inicial, el modelo MEDiNA, se inicializa asumiendo una velocidad inicial igual a cero en el instante inicial. Los valores de temperatura y salinidad (media mensual y anual), han sido implementados a partir de los valores extraídos de la base de datos, *WOA 05* (http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA05/pr_woa05.html) para las mallas que comprenden el dominio del Atlántico Norte, y de la base de datos *MEDAR-MEDATLAS* (<http://www.ifremer.fr/medar/>), para el Estrecho de Gibraltar y el Mar Mediterráneo. Y se ha utilizado como forzamiento para el viento las medias mensuales proporcionadas por la base de datos *Hellerman* (Hellerman y Rosenstein, 1983), (<http://www.gsfc.nasa.gov/>). Además se ha aplicado el método de la “*restauración*”, para introducir los forzamientos de los flujos de calor y agua dulce al modelo.

Se debe señalar que se ha impuesto como condición que el modelo utilice los mismos forzamientos repetidos cada año (“*año perpetuo*”), tanto para las climatologías de temperatura y salinidad como para los flujos de calor y agua dulce y las tensiones tangenciales en superficie (Fernandez et al., 2005; Fernández, V., 2004. Numerical Studies of the Mediterranean Sea Variability. Tesis doctoral, Universidad de las Islas Baleares). Esto será sin duda tema de discusión en futuros capítulos puesto que dicha imposición condicionará los resultados que se generarán tras la ejecución de modelo puesto que, si se repiten año tras año los forzamientos mensuales medios, el modelo será capaz de simular con exactitud patrones oceánicos medios como por ejemplo las

grandes masas de agua con características medias conocidas, pero no tendrá la misma precisión con eventos oceánicos que no presenten patrones medios definidos.

Como Condición de Contorno se ha impuesto en el Norte del modelo, la existencia de una plataforma que rompe la circulación, en el Ecuador, una capa de absorción con la que se pretende acercar los datos de temperatura y salinidad a los datos proporcionados por la climatología y en el fondo, se ha impuesto la condición de no deslizamiento.

Se ha paralelizado el código del modelo que inicialmente era secuencial. Esto ha sido un punto clave ya que ha permitido no solo obtener, sino estudiar y corregir los resultados en un tiempo razonable. De otro modo, hubiese sido inviable efectuar todas las pruebas que se han realizado para reparar errores o calibrar parámetros, ya que con el modelo secuencial se generaba 1 año de resultados por cada 5 días de ejecución. Por ejemplo, para obtener una serie de 10 años de resultados se hubieran necesitado 50 días, frente a los 25 que se precisan tras la paralelización del código. Se ha conseguido por tanto reducir a la mitad el tiempo total de cálculo y en este momento se genera 1 año de resultados en 2,5 días de ejecución.

Por último, la puesta a punto del modelo concluye con la implementación del formato binario *NetCDF* (cuya extensión es *.nc*), para almacenar los datos generados por el modelo. Se han archivado por un lado para cada mes, todos los datos de la capa superficial de cada una de las mallas con una resolución temporal de 6 horas, y por otro lado, se han guardado también para cada mes, todos los datos en todos los niveles de profundidad para cada una de las mallas (30 niveles), con una resolución temporal de 5 días (medias cada 5 días de cada una de las variables).

Como conclusión final, se puede decir que todas las implementaciones realizadas para la puesta a punto del modelo MEDiNA, han mejorado notablemente y adecuado el modelo para cumplir su objetivo final: simular la circulación oceánica en el Atlántico Norte y el Mar Mediterráneo.

