

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

*A Gloria, Suso,
Curri, David, Lucía
y Jose*

Agradecimientos

La realización de esta Tesis no hubiera sido posible sin la colaboración y ayuda de numerosas personas e instituciones. La contribución de cada una de ellas es de diversa índole, tanto personal como científica y técnica, pero todas han sido esenciales para que este trabajo haya llegado a su fin. Por eso me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento a cada una de ellas.

En primer lugar me gustaría agradecer a Raúl Medina e Iñigo Losada el haberme dado la oportunidad de incorporarme al grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas y comenzar de esta manera mi carrera investigadora, así como a todos los miembros del GIOC por haber contribuido a mi formación a lo largo de todos estos años y haberme prestado su ayuda desinteresadamente cada vez que la he necesitado. De la misma forma, quisiera señalar el apoyo recibido tanto por la Fundación Marcelino Botín como por el Instituto de Hidráulica Ambiental, ya que sin su financiación este trabajo no hubiera sido posible.

Quiero expresar mi gratitud a mis directores de Tesis bajo cuya dirección se ha desarrollado este trabajo.

A Raúl Medina le agradezco la confianza depositada en mí, su preocupación, consejos y apoyo a lo largo de la elaboración de esta Tesis, así como todos los medios puestos a mi alcance para el desarrollo de la misma. Para mí ha sido una gran oportunidad el poder realizar un trabajo de estas características dentro del Instituto de Hidráulica Ambiental, y quiero darle las gracias especialmente por ello.

Me resulta complicado expresar un agradecimiento conforme al esfuerzo que ha realizado en todos los aspectos Maitane Olabarrieta. Agradezco profundamente su preocupación, su paciencia, su entrega incondicional por encima de cualquier circunstancia, su ayuda siempre que la he solicitado, su ánimo ante cualquier problema e inconveniente y por todas las horas de más que ha dedicado a enseñarme y la gran cantidad de entusiasmo que ha puesto en ello. Maitane, quiero decirte que me ha encantado trabajar contigo todos estos años y poder aprender todo lo que me has enseñado. Nunca hubiese terminado esta Tesis sin tu ayuda y aportaciones. Gracias por todo.

Me gustaría agradecer también a la Dra. Alicia Lavín, sus explicaciones sobre la oceanografía del Golfo de Vizcaya. Al Dr. David Dietrich, agradecerle todo que me ha transmitido sobre el modelado oceánico desde los comienzos de esta Tesis, así como haber compartido conmigo algunos de sus puntos de vista sobre el “curioso” mundo de la ciencia. Y

a Jose Angel Herrero, agradecerle sus explicaciones, paciencia y ayuda con todo lo referente a las ejecuciones del modelo numérico. Inestimable ha sido también la ayuda de Paula Camus y Fernando Méndez con sus explicaciones y puntos de vista sobre las SOM, en esta última etapa de la Tesis.

A Fernando Méndez y Sonia Castanedo quiero agradecerles todo lo que me han enseñado durante estos años. Gracias por sus consejos, por su continuo interés y su disposición para ayudarme en todo momento.

Gracias a todos mis compañeros de despacho, Vero, Su, Paula, Ana, Melisa, Leo, Borja, David y Cristina, a todos los demás compañeros, Xavi, Chyntia, Pedro, Gabo, Omar, Lucía, Teresa, José María, Ana, Antonio Tomás, Fer, Pablo, Carol, Javi, Guache, Yolanda, Isabel....., y a todas las personas que aunque en esta última etapa de la Tesis no hayan estado cerca, han compartido conmigo muchísimas horas y experiencias. Gracias a todos por vuestro interés, por todos los buenos momentos que hemos compartido durante estos años, y por todo lo que nos hemos reído y disfrutado juntos.

Quiero recordar a todos mis amigos porque siempre han estado ahí y han sido un apoyo vital para la consecución de todos mis proyectos. Gracias a todas las "Nenitas", a todos mis amigos de Las Palmas, Barcelona, Asturias, Burgos, Madrid, Sarón..., al "Rhode Island Club" y a todos mis amigos del Máster y de Santander, porque desde que llegué a vivir aquí han hecho todo lo posible porque me sienta muy a gusto; Gracias especialmente a Óscar, Hana, Patty, Lucía, Rosa, Nacho, Pepa y Toñuco.

Quiero reconocer también lo importante que ha sido para mí el apoyo incondicional de mi familia, especialmente de mis padres, hermanos y tía. A mis padres Gloria y Suso les estaré siempre agradecida por el gran esfuerzo que han realizado para mi formación, su paciencia, confianza y cariño, y su continua preocupación, interés y respeto para que continúe con todo aquello que me ilusiona. A mis hermanos Curri, David y Lucía, y también a Manena y Svata quiero agradecerles sus constantes ánimos, apoyo, alegría y buen humor. A Lucía y a Curri quiero enviarles además muchos ánimos para que continúen con lo que están haciendo; estoy segura de que muy pronto ellas también estarán escribiendo los agradecimientos de sus Tesis y trabajos de Máster.

Por último quiero agradecer de manera muy especial a Jose su paciencia, su inquebrantable optimismo y la mezcla de motivación, apoyo, alegría y cariño que me ha transmitido siempre. Poco a poco he ido entendiendo lo importante que todo eso ha sido para mí a lo largo de todas las etapas y sensaciones que se atraviesan haciendo una Tesis. Muchas gracias por todo.

Resumen

Hoy día, existe una creciente sensibilidad social hacia la prevención de la contaminación del océano. La contaminación accidental por vertidos de hidrocarburos (contaminación química), es probablemente la que genera más alarma en la población puesto que ocurre con relativa frecuencia y provoca un gran impacto ecológico. La protección del litoral frente a dichos derrames se puede estudiar desde dos perspectivas diferentes: la primera sería a través de modelos operacionales de predicción de derrames de hidrocarburos (Abascal, A., 2008. Avances en el Modelado de Transporte de Hidrocarburos. Aplicación en la Respuesta a Vertidos Marinos Accidentales. Tesis doctoral, Universidad de Cantabria). La segunda sería mediante el desarrollo de planes de contingencia para la respuesta ante dicho vertido, para lo que se debe conocer la probabilidad de que un derrame de hidrocarburo, producido en un punto aleatorio del mar, alcance una determinada zona del litoral. Para ello, se necesitan series temporales largas de viento, oleaje y corrientes, que abarquen la región de estudio.

En el caso de España, en el momento del hundimiento del petrolero Prestige, no existía ninguna serie de datos con la suficiente resolución temporal ni espacial necesaria para realizar un mapa de probabilidades del litoral español, por lo que se tuvo que recurrir a la utilización de series temporales de datos generados numéricamente. Se utilizó para ello la base de datos de reanálisis SIMAR-44 (Puertos del Estado, 2006.), que contiene series temporales de 44 años de parámetros atmosféricos y oceanográficos procedentes del modelado numérico (viento, oleaje y corrientes), del Mar Mediterráneo occidental y de la costa Atlántica del Norte de España. Tanto los datos de viento, obtenidos mediante el modelo atmosférico regional REMO (Jacob, D., y Podzun, R., 1997), como los datos de oleaje, obtenidos mediante el modelo numérico WAM (WAMDI Group, 1988), y calibrados especialmente por Tomás et al. (2005), se consideraron adecuados para este estudio, pero no ocurrió lo mismo con el modelo utilizado para generar corrientes. El modelo de circulación HAMSOM (Puertos del Estado, 2006), utilizado por la base de datos SIMAR-44 para la generación de la serie temporal de corrientes, es un modelo barotrópico e integrado en vertical que no permite

determinar las corrientes superficiales con el grado de precisión requerido en este estudio.

Ante la falta de una base de datos de corrientes, se planteó el desarrollo de una herramienta para generar series temporales homogéneas de diversas variables oceanográficas como son la intensidad y dirección de las corrientes, la temperatura y la salinidad: un modelo numérico barotrópico-baroclínico tridimensional, que fuese capaz de reproducir adecuadamente las corrientes en la zona de estudio. El extenso trabajo realizado para subsanar dicha carencia, ha dado lugar al desarrollo de esta Tesis doctoral cuyo objetivo general es, generar series temporales de corrientes oceánicas en el Atlántico Norte y el Mar Mediterráneo, para identificar patrones de circulación en la zona del litoral español.

Se ha realizado en primer lugar para la elaboración de esta Tesis, una revisión del estado del arte, a partir del cual se ha podido constatar que el movimiento oceánico abarca una gran variedad de escalas espaciales y temporales que van, desde la micro turbulencia hasta la circulación a gran escala, que se extiende por las cuencas oceánicas y evoluciona con el tiempo a las escalas climáticas (Introduction to Geophysical Fluid Dynamics, Cushman-Roisin y Beckers, Cap.20, 2008). Las escalas espaciales de las estructuras oceánicas pueden ir desde unos pocos kilómetros (como por ejemplo los afloramientos de las zonas costeras), a estructuras del orden de 10-100 km (Eddies de mesoescala), o a escalas de cuenca (por ejemplo la corriente del Golfo). La presencia en el océano de todas estas estructuras con distintas escalas de variabilidad y la interacción entre ellas, hace que el océano sea un sistema muy complejo, que puede ser considerado como un fluido geofísico que muestra una alta variabilidad espacial y temporal. Los modelos de circulación oceánica, han demostrado ser una poderosa herramienta, para calcular soluciones aproximadas de las ecuaciones diferenciales parciales que rigen la dinámica de los océanos (Numerical Ocean Circulation Modelling, Haidvogel y Beckmann, 1999).

Para llevar a cabo el objetivo propuesto en esta Tesis, se ha desarrollado el Modelo MEDiNA. El modelo MEDiNA un modelo numérico tridimensional de escala oceánica en diferencias finitas, en el que se asume que el flujo es incompresible,

hidrostático y que es válida la aproximación “*rigid-lid*”. En cuanto al esquema numérico, es un modelo parcialmente implícito y totalmente conservativo. 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 intercambio de calor con la atmósfera, la variación de la salinidad por evaporación y por precipitación y el efecto de la tensión tangencial en superficie por la acción del viento. Como resultado, el modelo proporciona series temporales tridimensionales de salinidad, temperatura y velocidad (componentes vertical y horizontal), del océano.

Dicho modelo surge a partir de las implementaciones realizadas al Modelo DieCAST (Dietrich Center for Air Sea Technology, D. Dietrich et al., 1987), debido a la necesidad de acoplar las diferentes zonas del océano que influyen en la circulación oceánica del litoral español, el Atlántico Norte y el Mar Mediterráneo. Las principales implementaciones realizadas para obtener el modelo MEDiNA se resumen a continuación:

- ✚ 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.
 - ✚ Además, una de las aportaciones más importantes en la puesta a punto del modelo MEDiNA, ha sido la realización de un algoritmo de “*anidamiento en doble sentido*” (basado en el método del “*semipronóstico*” (Sheng J., et al., 2004, Dietrich, et al., 2004b)), 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 si.
 - ✚ 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), se han implementado 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.

- ✚ Se ha utilizado como forzamiento para el viento un año perpetuo extraído de las medias mensuales proporcionadas por la base de datos *Hellerman* (Hellerman y Rosenstein, 1983), (<http://www.gsfc.nasa.gov/>), y se ha aplicado el método de la “restauración”, para introducir los forzamientos de los flujos de calor y agua dulce al modelo. 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).
-

Mediante la ejecución del modelo MEDiNA, se han generado 46 años de series temporales de salinidad, temperatura y de las componentes u , v y w de la velocidad. Dichos resultados se han validado abordando el estudio y la comparación de los mismos, desde dos puntos de vista y en distintas zonas, para de esta manera mostrar la calidad de los resultados, en el máximo número de localizaciones posibles, dentro del dominio del modelo. En primer lugar se ha calculado el transporte en los principales canales y estrechos de la cuenca occidental del Mar Mediterráneo y del Golfo de México, el Estrecho de Gibraltar (5.69° W), el Canal de Ibiza (38.87° N), el Estrecho de Sicilia (37.2° N), el Canal de Yucatán (22.2°N), el Estrecho de Florida (82° W), y el Pasaje de Windward (20.1° N). En todos los canales y estrechos estudiados se ha podido comprobar que los valores obtenidos por el modelo MEDiNA se ajustan bastante bien a los valores dados por la bibliografía. Se resume a continuación en una tabla (tabla R1), la comparación entre los valores obtenidos por el modelo MEDiNA y los valores dados por la bibliografía:

Lugar de estudio	Valores del Modelo MEDiNA	Bibliografía	
		Valores (Sv)	Autores
Estrecho de Gibraltar	entrada $0,8 \pm 0,07$ salida $0,9 \pm 0,2$	entrada 0,7 salida 0,8	Bryden et al. (1994) Wu y Hines (1996) Astraldi et al. (1999) Hopkins (1999) García-Lafuente et al. (2002) Sannino et al. (2002)
		entrada 0,88 salida 0,92	Bryden and Kinder (1991)
		entrada 0,68 salida 0,72	Tsimplis y Bryden (2000)
		entrada 0,97 salida 1,01	Candela (2001)
Canal de ibiza	hacia el Norte 0,9	hacia el Norte 0,7	Pinot et al. (2002)
	hacia el Sur 0,5	hacia el Sur 0,2	
Estrecho de Sicilia	1,4	1,1	Astraldi et al. (1999)
		1,01	Beránger et al. (2004)
Canal de Yucatán	23	23-24	Abascal et al. (2003) Sheinbaum et al. (2002) Sheinbaum et al. (2008)
Pasaje de Windward	4,2	4	
Estrecho de Florida	23,5	23,2	Böning et al. (1991)
		20-40	Molinari et al. (1985) Leaman et al. (1987) Schott et al. (1988) Lee et al. (1985) Larsen y Sanford (1985)

Tabla R1. Comparación de los valores dados por el modelo MEDiNA y los valores mostrados por la bibliografía.

Además, se ha validado los resultados del modelo MEDiNA mediante la comparación de los mismos con una base de datos de climatologías (*GDP*), que proporciona entre otras variables, medias mensuales de velocidad. Tras esta comparación, se puede decir que los valores de la velocidad media obtenidos con el modelo MEDiNA, son aproximadamente el 10.69% inferiores a los dados por la base de datos *GDP*. Es decir, el modelo MEDiNA subestima los valores dados por la base *GDP*. En cuanto a la trayectoria de la Corriente del Golfo se puede decir que se ajusta bien, aunque su posición varía existiendo algunas zonas donde el modelo sobreestima (las zonas situadas al Norte de la trayectoria de la corriente del Golfo) y otras zonas (las situadas al Sur), donde subestima los valores dados por la base de datos de climatologías (*GDP*).

Aunque el ajuste entre los datos del modelo MEDiNA y los datos *GDP* no es perfecto pero se considera satisfactorio, ya que las diferencias obtenidas se pueden deber a las propias diferencias que presentan los datos comparados, ya que el modelo MEDiNA utiliza vientos climatológicos (año perpétuo), donde la transferencia de momento no es igual que con los vientos reales donde existen picos de intensidad (como los que utiliza la base de datos *GDP*). Además, las velocidades dadas por el modelo MEDiNA están promediadas en el centro de las capas, mientras que las velocidades de la base de datos *GDP*, son interpolaciones de medidas realizadas con boyas.

Después de validar y demostrar la calidad de los resultados, se ha mostrado a continuación la capacidad que tiene el modelo MEDiNA para simular la formación y la propagación de la masa de agua MOW (*Mediterranean Overflow Water*). El modelado de la dinámica de esta masa de agua constituye hoy día un aspecto de gran interés dentro de la comunidad científica. La MOW se forma en el mar Mediterráneo, y se propaga a través del estrecho de Gibraltar y a lo largo de la zona Sur de la Península Ibérica a medida que va alcanzando su profundidad de equilibrio, y los resultados obtenidos se muestran acordes con los datos proporcionados por la bibliografía existente en dicha zona. Además, se ha conseguido demostrar que los modelos-z, como el modelo MEDiNA, son capaces de simular adecuadamente las corrientes de densidad, como por ejemplo la MOW (Dietrich et al., 2008).

A continuación, y con el objetivo de obtener patrones de circulación oceánica y su relación con los patrones atmosféricos en diferentes zonas del litoral español, el Golfo de Vizcaya y el Mar Mediterráneo, se han aplicado dos herramientas estadísticas para la exploración de los resultados logrados; la primera de ellas es la técnica estadística estándar, análisis de *Componentes Principales*, también denominada análisis de *Funciones Ortogonales Empíricas* (Empirical Orthogonal Function, EOF), y la segunda son las *Redes Neuronales Auto-Organizativas* (Self Organizing Maps, SOM). Se ha demostrado que tanto los EOF como las SOM, además de ser potentes herramientas estadísticas, son adecuadas para estudiar en este caso, las series temporales de variables oceanográficas obtenidas a partir del modelo MEDiNA, con el fin de obtener patrones de circulación, así como la relación de éstos con los patrones atmosféricos. Por tanto, se puede extender la aplicación de dichas herramientas así como la metodología desarrollada en este estudio, para cualquier lugar donde se desee conocer la relación entre los patrones de circulación oceánica y atmosférica.

Por último, se han resumido las conclusiones más importantes obtenidas en esta Tesis doctoral, así como las futuras líneas de investigación a seguir.

Cabe mencionar que algunos resultados de la presente Tesis se han publicado en revistas Science Citation Index (SCI), y se han presentado en diversos congresos nacionales e internacionales. Toda esta información se encuentra resumida en el apartado final de esta Tesis, donde se pueden encontrar las referencias completas tanto de las publicaciones como de las comunicaciones en congresos.

INDICE

Lista de Figuras.....	v
Lista de Tablas.....	xix
Lista de Símbolos.....	xxi

Capítulo 1: Introducción

1.1. Introducción.....	1
1.1.1. Exposición de los motivos.....	1
1.1.1.1. <i>Variabilidad Oceánica</i>	5
1.1.1.2. <i>Objetivo general</i>	10
1.1.2. Revisión del Estado del conocimiento actual.....	11
1.1.2.1. <i>Características de la Circulación Oceánica</i>	11
1.1.2.1.1. Variabilidad atmosférica y oceánica en la zona de estudio.....	14
1.1.2.1.2. Circulación general, transporte, masas de agua y estacionalidad.....	21
<u>El océano Atlántico Norte</u>	22
<i>Masas de agua</i>	24
<i>Aguas superficiales</i>	24
<i>Aguas intermedias</i>	25
<i>Aguas profundas</i>	26
<i>Principales sistemas de Corrientes</i>	27
<i>Eddies y transporte de eddies</i>	30
<u>El Mar Mediterráneo</u>	31
<i>Masas de agua, estacionalidad y circulación general</i>	32
<u>El Golfo de Vizcaya</u>	36
<i>Masas de agua</i>	36
<i>Aguas superficiales</i>	37
<i>Aguas intermedias</i>	37
<i>Aguas profundas</i>	38
<i>Circulación general</i>	38
1.1.3. Modelado Numérico de la Circulación Oceánica.....	44
1.1.4. Técnicas de aprendizaje automático.....	47
1.2. Objetivos de la Tesis.....	48
1.3. Organización y estructura de la Tesis.....	49

Capítulo 2: Modelo Oceánico de Circulación

2.1. Introducción.....	51
2.2. Ecuaciones de Gobierno.....	53
2.3. Esquemas numéricos.....	55
2.3.1. Discretización Espacial.....	55
2.3.2. Discretización Temporal.....	58
2.3.2.1. <i>Cálculo de la presión</i>	59
2.3.3. Modelos de Cierre.....	63
2.3.3.1. <i>Modelo de cierre para la fricción en el fondo</i>	63
2.3.3.2. <i>Modelo de cierre para la viscosidad de remolino vertical</i>	64

Capítulo 3: Puesta a punto y descripción del modelo MEDiNA

3.1. Introducción	68
3.1.1. Descripción del Modelo MEDiNA.....	68
3.2. Puesta a punto del modelo	69
3.2.1. Batimetría.....	69
3.2.2. Mallas.....	70
3.2.2.1. Anidamiento entre Mallas.....	72
3.2.3. Condición Inicial.....	74
3.2.3.1. Base de datos de los campos de temperatura y salinidad.....	74
3.2.4. Forzamientos.....	79
3.2.4.1. Tensión Tangencial en Superficie.....	79
3.2.4.2. Flujos de Calor y de Agua Dulce.....	80
3.2.5. Condiciones de contorno.....	81
3.2.6. Paralelización.....	82
3.2.7. Formato de almacenaje de los resultados.....	85
3.3. Resumen y conclusiones	85

Capítulo 4: Validación del Modelo

4.1. Equilibrio dinámico del sistema	89
4.1.1 Equilibrio dinámico del sistema.....	89
4.2. Comparación de medidas de corrientes superficiales con resultados numéricos	92
4.2.1. Introducción.....	92
4.2.2. Base de datos Global Drifter Program.....	95
4.2.3. Validación.....	97
4.3. Comparación de los valores del transporte en canales y estrechos	106
<i>Estrecho de Gibraltar</i>	107
<i>Canal de Ibiza</i>	113
<i>Estrecho de Sicilia</i>	117
<i>Canal de Yucatán</i>	120
<i>Pasaje de Windward</i>	122
<i>Estrecho de Florida</i>	123
4.4. Resumen y Conclusiones	126

Capítulo 5: Simulación de corrientes de densidad en el Estrecho de Gibraltar

5.1. Introducción	131
5.2. Modelado numérico de las corrientes de densidad	134
5.3. Resultados de la simulación	137
5.3.1. Intercambio de masas de agua a través del Estrecho de Gibraltar y corrientes Asociadas.....	138
5.3.2. Hundimiento de la MOW hasta su profundidad de equilibrio y propagación en el Golfo de Cádiz.....	145
5.3.3. Penetración de las aguas de la MOW en el Atlántico Norte.....	156
5.4. Resumen y conclusiones	158

Capítulo 6: Patrones de circulación oceánica en el litoral español

6.1. Introducción.....	164
6.2. Funciones ortogonales Empíricas (EOF).....	165
6.2.1. <i>Aplicación de EOF para la organización estadística de los resultados.....</i>	<i>166</i>
6.3. Redes Neuronales Auto-Organizativas (SOM).....	171
6.3.1. <i>Aplicación de las SOM, para organización de los resultados.....</i>	<i>173</i>
6.3.1.1. <i>SOM en el Mar Mediterráneo.....</i>	<i>174</i>
6.3.1.1.1 <i>Trayectorias en el campo de la SOM del Mar Mediterráneo.....</i>	<i>180</i>
6.4. Relación entre los patrones de circulación atmosférica y oceánica en el Mar Mediterráneo.....	181
6.5. Patrones de circulación en el Golfo de Vizcaya.....	187
6.5.1. <i>SOM en el Golfo de Vizcaya.....</i>	<i>187</i>
6.5.1.1. <i>Trayectorias en el campo de la SOM.....</i>	<i>193</i>
6.5.2. <i>Patrones de circulación oceánica en el Golfo de Vizcaya.....</i>	<i>193</i>
6.6. Conclusiones.....	198

Capítulo 7: Conclusiones Generales y futuras líneas de investigación

7.1. Conclusiones Generales.....	201
<i>Capítulo I.....</i>	<i>201</i>
<i>Capítulo II.....</i>	<i>202</i>
<i>Capítulo III.....</i>	<i>202</i>
<i>Capítulo IV.....</i>	<i>204</i>
<i>Capítulo V.....</i>	<i>209</i>
<i>Capítulo VI.....</i>	<i>211</i>
7.2. Futuras líneas de investigación.....	213

Capítulo 8: Bibliografía y Publicaciones derivadas de la investigación

Bibliografía.....	217
Publicaciones derivadas de la investigación doctoral.....	243

Anejos

Anejo I:	
Esquema reducido de dispersión de cuarto orden.....	245
Anejo II:	
Desarrollo numérico del esquema Leapfrog.	249
Anejo III:	
Patrones de circulación oceánicos y atmosféricos en el Mar Mediterráneo.....	251

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Grafico de las trayectorias seguidas por tres boyas Argos.....	3
Figura 1.2. Ecuación del transporte lagrangiano y grafico que representa la aleatoriedad que tiene un vertido de alcanzar un punto concreto de la costa.....	3
Figura 1.3. Tipos de procesos y estructuras oceánicas ordenadas de acuerdo a sus respectivas escalas espaciales y temporales. (Fuente: Introduction to Geophysical Fluid Dynamics, Cushman-Roisin y Beckers, Cap.1, 2008).....	6
Figura 1.4. Tipos de procesos y estructuras atmosféricas ordenadas de acuerdo a sus respectivas escalas espaciales y temporales. (Fuente: Introduction to Geophysical Fluid Dynamics, Cushman-Roisin y Beckers, Cap.1, 2008).....	8
Figura 1.5. Principales cinturones de vientos asociados a la circulación general de la atmósfera.....	11
Figura 1.6. Principales sistemas de corrientes oceánicas superficiales. Las corrientes cálidas dibujadas en rojo y las corrientes frías en azul (Fuente: University Corporation for Atmospheric Research (UCAR)).....	12
Figura 1.7. Imagen de satélite de la costa este de los Estados Unidos, donde los colores naranja y amarillo señalan las aguas más cálidas que corresponden a la corriente del Golfo, mientras que los colores azul y verde representan aguas más frías y corresponden al resto de las aguas del océano Atlántico (Fuente: imagen extraída de la NOAA).....	13
Figura 1.8. Trayectoria de una boya de deriva.....	14

Figura 1.9. Sistema de circulación termohalina en el océano. Las aguas frías y saladas recién formadas por convección profunda en latitudes altas son arrastradas por la “cinta transportadora” del océano a través del fondo de las cuencas oceánicas. Estas aguas eventualmente suben a la superficie en las zonas cálidas y de nuevo vuelven a los lugares de convección profunda. El tiempo para completar dicho recorrido es del orden de varios cientos de miles de años. (Fuente: Kuhlbrodt et al., 2007)..... 15

Figura 1.10. Condiciones prevalecientes durante las fases de máximos y mínimos de la Oscilación de Atlántico Norte (NAO) (Fuente: R.R. Dickson and I. Gooch, CEFAS.).....16

Figura 1.11. Altura del nivel del mar, extraída de los datos de altimetría del Topex/Poseidon entre 1992 y 1997. (Fuente: S. Esselborn, Institut für Meereskunde, Univ. Hamburg.).....17

Figura 1.12. Sistema principal de corrientes oceánicas en el Atlántico Norte.....18

Figura 1.13 Mapas de isóbaras para situaciones típicas meteorológicas en la zona del Atlántico noreste (Fuente:Météo France).....20

Figura 1.14. Mapa del Océano Atlántico.....23

Figura 1.15. Representación esquemática del agua Mediterránea saliendo a través del Estrecho de Gibraltar y la formación de Meddies (Fuente: Richardson (1993)).....26

Figura 1.16. Abertura del Banco Goringe.....27

Figura 1.17. Transporte geostrófico estimado en las capas superficiales y profundas al noreste de Atlántico Norte (Fuente: van Aken and Becker (1996)).....28

Figura 1.18. Media quasi-geostrófica de Corrientes superficiales entre 1948 y 1997 (Fuente: Alves et al., (1998)).....29

Figura 1.19. Mapa del Mar Mediterráneo.....31

Figura 1.20. Principales cuencas y estrechos del Mar Mediterráneo.....32

Figura 1.21. Mapa del Estrecho de Gibraltar.....32

Figura 1.22. Circulación superficial esquemática en la cuenca oeste del Mar Mediterráneo (Fuente: Millot, 1999).....34

Figura 1.23. Circulación superficial esquemática en la cuenca este del Mar Mediterráneo. (Fuente: Robinson an Golnaraghi, 1994).....35

Figura 1.24. Mapa del Mar Cantábrico.....36

Figura 1.25. Circulación en el Golfo de Vizcaya (Koutsikopoulos and Le Cann, 1996).....39

Figura 1.26. Imagen de temperatura superficial, que muestra un afloramiento cerca de la costa oeste de la Península Ibérica (2–8 Agosto de 1998). (Fuente: CCMS).....41

Figure 1.27. Secciones transversales sobre la plataforma de Santander ((3° 47' W) July 1995), de temperatura y salinidad. (Fuente: Lavín et al. (1998)).....42

Figura 2.1. (a) Ejemplo de un volumen de control, (b), ejemplo de volúmenes de control verticales, y (c), ejemplo de una malla formada por volúmenes de control.....55

Figura 2.2. Ejemplo de la unión mediante “aproximación en escalera”.....55

Figura 2.3. (a) Ejemplo del sistema de coordenadas x y z en los ejes, (b) Ejemplo de los incrementos longitudinal, latitudinal y vertical, en un volumen de control.....56

Figura 2.4. Mallas tipo Arakawa A (a) y Arakawa C (c). (Fuente: Numerical Modeling of Ocean Dynamics. Z. Kowalik, 1995).....57

Figura 2.5. Volumen de control del Modelo <i>DieCAST</i> , donde $Q(i,j,k)$ es cualquier cantidad hecha promedio en el centro de la celda (u, v, S, T, p y ρ) y U, V, W son las cantidades promediadas en las caras.....	58
Figura 2.6. Esquema de paso de tiempo en el Método Leapfrog.....	59
Figura 3.1. Dominio de estudio del Modelo <i>MEDiNA</i>	69
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).....	70
Figura 3.3. Mallas del Modelo MEDiNA sobre la batimetría ETOPO2 (m de profundidad), de la zona de estudio.....	70
Figura 3.4. Organigrama del método del semipronóstico.....	73
Figura 3.5. Ejemplo de anidamiento entre dos mallas.....	73
Figura 3.6. Gráficas de Salinidad y Temperatura superficial extraídas de la base de datos WOA 2005.....	76
Figura 3.7. Países participantes en el proyecto MEDAR-MEDATLAS 2002 (Fuente: Ifremer).....	77
Figura 3.8. Ejemplo de la temperatura a 100 m de profundidad en la malla del Mar Mediterráneo.....	78
Figura 4.1 a. Energía Cinética (m^2/s^2) de la malla GOM, NAB, IBE, VIS, GIB Y MED.....	91
Figura 4.1 b. Energía Cinética (m^2/s^2), de la malla GOM, NAB, IBE, VIS, GIB Y MED.....	92

Figura 4.2. Energía Cinética (m^2/s^2) en todo el dominio de modelo MEDiNA.....93

Figura 4.3. Localización de las secciones seleccionadas para calcular el transporte en el Mar Mediterráneo..... 94

Figura 4.4. Localización de las secciones seleccionadas para calcular el transporte en el Golfo de México.....95

Figura 4.5. Sección vertical (5.65° W) de la salinidad en el Estrecho de Gibraltar (Mes de Julio) obtenida a partir de los resultados del modelo MEDiNA.....96

Figura 4.6. Perfil de salinidad en el Estrecho de Gibraltar (39.5° N, 5.65° W) (Mes de Julio) obtenido a partir de los resultados del modelo MEDiNA.....96

Figura 4.7. Salinidad superficial, del Mediterráneo y Estrecho de Gibraltar (Mes de Diciembre) obtenida a partir de los resultados del modelo MEDiNA.....97

Figura 4.8. (a) Flujo de entrada (Sv) en el Estrecho de Gibraltar. (b) Flujo de salida (Sv) en el Estrecho de Gibraltar.....98

Figura 4.9. (a) Flujo medio (10años), de entrada (Sv) en el Estrecho de Gibraltar. (b) Flujo medio (10años), de salida (Sv) en el Estrecho de Gibraltar.....99

Figura 4.10. Resta del flujo de entrada menos el flujo de salida (Sv), en el Estrecho de Gibraltar.....100

Figura 4.11. Sección vertical de la salinidad en el Canal de Ibiza (38.87° N), (Mes de Julio), obtenida con los resultados del modelo MEDiNA.....101

Figura 4.12. Perfil de salinidad en el Canal de Ibiza (38.87° N, 0.66° E) (Mes de Julio), obtenido a partir de los resultados del modelo MEDiNA.....102

Figura 4.13. (a) Flujo hacia el Norte (Sv) en el Canal de Ibiza. (b) Flujo hacia el Sur (Sv) en el Canal de Ibiza.....103

Figura 4.14. Resta del flujo medio (10 años), hacia el Norte menos el flujo medio (10años), hacia el Sur en el Canal de Ibiza.....104

Figura 4.15. Sección vertical de la salinidad en el Estrecho de Sicilia (37.2° N), (Mes de Julio), obtenida a partir de los datos del Modelo MEDiNA.....105

Figura 4.16. (a) Flujo hacia el norte (Sv) en el Estrecho de Sicilia. (b) Flujo hacia el Sur (Sv) en el Estrecho de Sicilia.....106

Figura 4.17. Resta del flujo medio (10 años), hacia el Norte menos el flujo medio (10años), hacia el Sur en el Estrecho de Sicilia.....107

Figura 4.18. Sección vertical de la salinidad en el Canal de Yucatán (21.35°N), en el mes de Julio.....108

Figura 4.19. Perfil de salinidad en el Canal de Yucatán (21.35° N, 85.5° W) (Mes de Julio).....109

Figura 4.20. Resta del flujo medio (10 años) hacia el Norte (Sv), menos el flujo medio (10 años) hacia el Sur (Sv), en el Canal de Yucatán.....109

Figura 4.21. Resta del flujo medio (10 años) hacia el Norte (Sv), menos el flujo medio (10 años) hacia el Sur (Sv), en el Pasaje de Windward.....110

Figura 4.22. Localización de las secciones del Estrecho de Florida y de la Isla Gran Bahama para calcular el transporte en el Golfo de México.....112

Figura 4.23. Resta del flujo medio (10 años) hacia el Este (Sv), menos el flujo medio (10 años) hacia el Oeste (Sv), en el Estrecho de Florida.....112

Figura 4.24. Resta del flujo medio (10 años) hacia el Norte (Sv), menos el flujo medio (10 años) hacia el Sur (Sv), en el Estrecho que separa la Península de Florida de la Isla Gran Bahama.....	113
Figura 4.25. Ejemplo esquemático de un tipo de boya de deriva utilizada <i>GDP</i> con todas sus componentes a escala (figura de la izquierda) y ejemplo de la parte superior de una boya flotando en el océano (figura de la derecha) (Fuente: http://www.aoml.noaa.gov/phod/dac/gdp.html).....	117
Figura 4.26. Distribución de las estaciones receptoras del sistema ARGOS (Fuente: CLS-ARGOS).....	118
Figura 4.27. Densidad de observaciones (días de deriva por grado al cuadrado).....	118
Figura 4.28. Modulo de las velocidades superficiales (m/s), de la base de datos <i>GDP</i> , para todos los meses del año.....	120
Figura 4.29. Media (10 años) del módulo de las velocidades superficiales (m/s), para todos los meses del año, obtenidas a partir de los resultados del modelo MEDiNA....	121
Figura 4.30. Media (10 años) del módulo de las velocidades superficiales, para todos los meses del año, obtenidas a partir de los resultados del modelo MEDiNA, e interpoladas a una malla de 1° de resolución.....	122
Figura 4.31. (a) Modulo de la velocidad media (10 años) de los valores dados por la base de datos <i>GDP</i> (línea roja) y los resultados del modelo MEDiNA (línea azul). (b) Error absoluto de la velocidad media (10 años) entre los valores dados por la base de datos <i>GDP</i> y los resultados del modelo MEDiNA.....	123
Figura 4.32. Media anual (12 meses), del modulo de la velocidad (m/s), (a), obtenida a partir de la base de datos <i>GDP</i> . (b) obtenida a partir de los resultados del modelo MEDiNA.....	125

Figura 4.33 a. Matriz de ceros y unos de la base de la base de datos <i>GDP</i> , de los resultados numéricos del modelo MEDiNA y resta entre ambas matrices (enero, febrero, marzo y abril).....	126
Figura 4.33 b. Matriz de ceros y unos de la base de la base de datos <i>GDP</i> , de los resultados numéricos del modelo MEDiNA y resta entre ambas matrices (mayo, junio, julio y agosto).....	126
Figura 4.33 c. Matriz de ceros y unos de la base de la base de datos <i>GDP</i> , de los resultados numéricos del modelo MEDiNA y resta entre ambas matrices (septiembre, octubre, noviembre y diciembre).....	127
Figura 5.1. (a) Flujo (Sv) en el Estrecho de Gibraltar (10 años). (b) Flujo medio mensual (Sv), (10 años), en el Estrecho de Gibraltar.....	140
Figura 5.2. (a) Temperatura media mensual (°C) a 170 m de profundidad. (b) Perfil de Temperatura media mensual (°C) (37.8° N y 3.53° E).....	142
Figura 5.3. Salinidad (psu), en la parte más angosta del Estrecho de Gibraltar.....	142
Figura 5.4. Superficie libre (m) y vectores de velocidad (m/s), a 5 m (a), 142 m (c), 373 m (e) y 739 m de profundidad (g) y módulo de la velocidad (m/s) y vectores de velocidad (m/s), a 5 m (b), 142 m (d), 373 m (f) y 739 m de profundidad (h).....	144
Figura 5.5. Secciones verticales de salinidad (psu) para 5 transectos del Estrecho de Gibraltar.....	146
Figura 5.6. Modulo de la velocidad superficial (m/s) en el Estrecho de Gibraltar y el Mar de Alborán.....	146
Figura 5.7. Salinidad (psu), en el Estrecho de Gibraltar para diferentes profundidades.....	148

Figura 5.8. Secciones verticales de salinidad (a), temperatura (b), componente u de la velocidad (c) y componente v de la velocidad (d), a 8.1875 °W.....149

Figura 5.9 (a) Localización de las estaciones de muestreo. (b) Distribución vertical de la salinidad y velocidad a 8.25° W, obtenidas a partir de las medidas realizadas por Johnson et al., (2002). (c) Distribución de la salinidad y velocidad a 8.25° W, obtenida por el modelo de Johnson et al. (2002).....150

Figura 5.10. Distribución de la salinidad a 8.25° W, obtenida con los resultados del modelo MEDiNA.....151

Figura 5.11. Secciones verticales de salinidad (psu) para 9 transectos al Oeste del Estrecho de Gibraltar.....152

Figura 5.12. Secciones verticales de salinidad (psu) para 5 transectos longitudinales de la malla IBE.....154

Figura 5.13. Sección vertical de la salinidad (psu) a 43° N (a) resultados del modelo MEDiNA, (b), resultados de la climatología GDEM.....155

Figura 5.14. Secciones verticales de la media anual de salinidad (psu), en el Golfo de Vizcaya (a), a 7.862° W (b), a 6.0562° W y (c), a 3.4937° W.....156

Figura 5.15. Sección vertical de la salinidad (psu) a 46.06° N, obtenida por Iorga y Lozier (1999) (Figura 15 a de su artículo).....157

Figura 5.16. (a) Sección vertical de la salinidad (psu) a 15° W, obtenida por Iorga y Lozier (1999), (Figura 11 b de su artículo). (b) Sección vertical de la salinidad (psu) a 15° W, obtenida por Drillet et al. (2005), (Figura 4a de su artículo).....158

Figura 5.17. Sección vertical de la salinidad (psu) a 15° W, obtenida por el modelo MEDiNA.....159

Figura 6.1. Media temporal (m/s) y modo 1, 2, 3, 4, 5 y 6 espacial, temporal y temporal medio (20 años), del las componentes u y v de la velocidad de la corriente superficial, en la cuenca mediterránea.....169

Figura 6.2. Esquema de una red auto-organizativa con 9 neuronas (3x3), organizadas en una red 2D. (Fuente: Gutiérrez et al., 2004).....171

Figura 6.3. Patrones del modulo de la velocidad superficial (m/s), en la cuenca mediterránea.....175

Figura 6.4. Ejemplo de una malla o tela que cubre todos los datos analizados por la SOM y que simboliza el espacio continuo donde ésta calcula los patrones.....175

Figura 6.5. Histograma del número de datos que caen en cada patrón.....176

Figura 6.6. Frecuencia de presentación de los datos.....177

Figura 6.7. Probabilidad de presentación de los datos cada mes (los números que se sitúan dentro de los cuadrados coloreados indican el número de patrón).....179

Figura 6.8. Recorrido de los patrones oceánicos en la cuenca mediterránea.....181

Figura 6.9. Campos de tensiones tangenciales superficiales (dinas/cm^2), proporcionados por la base de datos Hellerman, en la cuenca mediterránea (Fuente: Hellerman y Rosenstein, 1983).....182

Figura 6.10. Tensión tangencial del viento en superficie (dinas/cm^2), media (20 años), del modulo de la velocidad superficial (m/s), y patrones oceánicos asociados (m/s), para el mes de diciembre.....185

Figura 6.11. Comparación entre los valores máximos de la media (20 años), del módulo de la velocidad (adimensional), de las corrientes y del módulo (adimensional), de las tensiones tangenciales cada mes.....187

Figura 6.12. Patrones del modulo de la velocidad (m/s), para las 3 capas de profundidad estudiadas en el Golfo de Vizcaya.....188

Figura 6.13. a, histograma del número de datos que caen en cada patrón y b, frecuencia de presentación de los datos de la SOM del Golfo de Vizcaya.....189

Figura 6.14. Probabilidad de presentación de los datos cada mes (los números que se sitúan dentro de los cuadrados coloreados indican el número de patrón), de la SOM en el Golfo de Vizcaya.....191

Figura 6.15. Recorrido de los patrones oceánicos tridimensionales en el Golfo de Vizcaya.....193

Figura 6.16. Campos de tensiones tangenciales superficiales (dinas/cm^2), proporcionados por la base de datos Hellerman, en el Golfo de Vizcaya.....195

Figura 6.17. Comparación entre los valores mensuales máximos medios (de 20 años), del módulo de la velocidad (adimensional), de la corrientes superficial y del módulo (adimensional), de las tensiones tangenciales, en el Golfo de Vizcaya.....196

Figura 6.18. Batimetría y patrones oceánicos (m/s), con probabilidad de ocurrencia para el mes de enero en el Golfo de Vizcaya.....197

Figura 6.18. Batimetría y patrones oceánicos (m/s), con probabilidad de ocurrencia para el mes de diciembre en el Golfo de Vizcaya.....198

Figura I.1. Esquema de las celdas e índice para la interpolación de cuarto orden. Las X se corresponden con el centro de los volúmenes de control.....245

Figura II.1. Esquema de paso de tiempo en el Método Leapfrog.....249

Figura III.1. Tensión tangencial del viento en superficie (dinas/cm²), media (20 años), del modulo de la velocidad superficial (m/s), y patrones oceánicos asociados (m/s), para el mes de enero.....251

Figura III.2. Tensión tangencial del viento en superficie (dinas/cm²), media (20 años), del modulo de la velocidad superficial (m/s), y patrones oceánicos asociados (m/s), para el mes de febrero.....252

Figura III.3. Tensión tangencial del viento en superficie (dinas/cm²), media (20 años), del modulo de la velocidad superficial (m/s), y patrones oceánicos asociados (m/s), para el mes de marzo.....253

Figura III.4. Tensión tangencial del viento en superficie (dinas/cm²), media (20 años), del modulo de la velocidad superficial (m/s), y patrones oceánicos asociados (m/s), para el mes de abril.....254

Figura III.5. Tensión tangencial del viento en superficie (dinas/cm²), media (20 años), del modulo de la velocidad superficial (m/s), y patrones oceánicos asociados (m/s), para el mes de mayo.....255

Figura III.6. Tensión tangencial del viento en superficie (dinas/cm²), media (20 años), del modulo de la velocidad superficial (m/s), y patrones oceánicos asociados (m/s), para el mes de junio.....256

Figura III.7. Tensión tangencial del viento en superficie (dinas/cm²), media (20 años), del modulo de la velocidad superficial (m/s), y patrones oceánicos asociados (m/s), para el mes de julio.....257

Figura III.8. Tensión tangencial del viento en superficie (dinas/cm²), media (20 años), del modulo de la velocidad superficial (m/s), y patrones oceánicos asociados (m/s), para el mes de agosto.....258

Figura III.9. Tensión tangencial del viento en superficie (dinas/cm²), media (20 años), del modulo de la velocidad superficial (m/s), y patrones oceánicos asociados (m/s), para el mes de septiembre.....259

Figura III.10. Tensión tangencial del viento en superficie (dinas/cm²), media (20 años), del modulo de la velocidad superficial (m/s), y patrones oceánicos asociados (m/s), para el mes de octubre.....260

Figura III.11. Tensión tangencial del viento en superficie (dinas/cm²), media (20 años), del modulo de la velocidad superficial (m/s), y patrones oceánicos asociados (m/s), para el mes de noviembre.....261

Figura III.12. Tensión tangencial del viento en superficie (dinas/cm²), media (20 años), del modulo de la velocidad superficial (m/s), y patrones oceánicos asociados (m/s), para el mes de diciembre.....262

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Escalas espaciales, de velocidad y temporales de algunos fenómenos oceánicos (Fuente: Introduction to Geophysical Fluid Dynamics, Cushman-Roisin y Beckers, Cap.1, 2008).....	5
Tabla 1.2. Escalas espaciales, de velocidad y temporales de algunos fenómenos atmosféricos (Fuente: Introduction to Geophysical Fluid Dynamics, Cushman-Roisin y Beckers, Cap.1, 2008).....	6
Tabla 1.3. Flujos estacionales medios (Sverdrup) de la AzC y de la AzCC. (Fuente: Alves (1996)).....	29
Tabla 1.4. Masas de Agua en la parte occidental del Golfo de Cádiz, de la Península Ibérica y en el Golfo de Vizcaya. (Fuente: OSPAR 2000).....	38
Tabla 1.5. Modelos de circulación oceánica tridimensional (Fuente: http://www.ocean-modeling.org/).....	45
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.....	71
Tabla 3.2. Características generales del multiprocesador (Fuente: Manual del Usuario, 2008. Arquitectura y Tecnología de Computadores. Universidad de Cantabria).....	84
Tabla 4.1. Valores en Sv (dados por diferentes autores), del flujo de la MAW que atraviesa el Estrecho de Gibraltar y de la MOW que atraviesa el Estrecho de Gibraltar.....	99

Tabla 4.2. Comparación de los valores dados por el modelo MEDiNA y los valores mostrados por la bibliografía.....130

Tabla 6.1. Tabla de modos que explica el 99 % de la varianza de las componentes u y v de la velocidad de la corriente superficial, en el Mar Mediterráneo.....167

Tabla 6.2. Patrones y probabilidad de agrupación de los datos de cada mes.....180

Tabla 6.3. Valores máximos y mínimos de la media (20 años), del módulo de la velocidad superficial de las corrientes (m/s), y de las tensiones tangenciales del viento en superficie (dinas/cm²), para cada mes, en la cuenca mediterránea.....184

Tabla 6.4. Patrones y probabilidad de agrupación de los datos de cada mes en el Golfo de Vizcaya.....192

Tabla 6.5. Valores mensuales máximos medios (de 20 años), del módulo de la velocidad de la corriente (m/s), y de las tensiones tangenciales del viento en superficie (dinas/cm²), en el Golfo de Vizcaya.....169

Tabla 7.1. Comparación de los valores dados por el modelo MEDiNA y los valores mostrados por la bibliografía.....208

LISTA DE SÍMBOLOS

A_h	viscosidad de remolino horizontal
A_v	viscosidad de remolino horizontal
C_D	coeficiente de arrastre
c_j	vector que determina la tasa de cambio alrededor del vector ganador
$Dx,$	incremento longitudinal
Dy	incremento latitudinal
Dz	incremento vertical
d	distancia global entre grupos
EK	energía cinética
F	parámetro de Coriolis
g	gravedad
h	núcleo de vecindad
K_h	difusividad de remolino horizontal
K_v	difusividad de remolino vertical
m	número total de grupos.
$n-1$	nivel antiguo de tiempo en el esquema numérico leapfrog
n	nivel intermedio de tiempo en el esquema numérico leapfrog
$n+1$	nivel nuevo de tiempo en el esquema numérico leapfrog
Q	cualquier cantidad hecha promedio en el centro de la celda
P	presión
p	número de modos
Re	número de Reynolds
Ri	gradiente del numero de Richardson
S	salinidad
T	temperatura potencial
u	componente de la velocidad para el eje x
U	velocidad promediada en las caras de las celdas

v	componente de la velocidad para el eje y
V	velocidad promediada en las caras de las celdas
v_k	vector de referencia
v_w	vector de referencia “ganador”
w	componente de la velocidad para el eje z
W	velocidad promediada en las caras de las celdas
$ W $	magnitud de la velocidad vertical
w	índice del vector de referencia ganador (Capítulo 6)
x_i	vectores de entrada
x	vector que contiene las posiciones donde se encuentra definida una variable
Z	variable genérica
τ	vector que contiene los tiempos donde se encuentra definida una variable.
ρ	densidad
α	tasa de aprendizaje
σ	amplitud del núcleo de vecindad