

4.3. ANÁLISIS DE LOS VÓRTICES Y FENÓMENOS ASOCIADOS EN EL MEDITERRÁNEO NOROCCIDENTAL EN EL PERÍODO ENTRE 1996 Y 1998

4.3.1. Remolinos y filamentos naturales en la superficie del mar

Las primeras observaciones y fotografías de los vórtices y las espirales en la superficie marina fueron hechas desde el satélite estadounidense *Apollo-Saturn* en octubre del 1968 (Munk, 2001). Entonces las formas espirales o elípticas fueron detectadas mediante “*sun glitter*” en la superficie marina. El tamaño de estas formas en la superficie del mar es tan grande que ni desde los aviones se pueden ver por completo.

En los años 70 las primeras imágenes del SAR y de otros dispositivos de satélites confirmaron la existencia de estos remolinos y filamentos espirales en escala global. Los vórtices marinos tienen tamaño de 10 a 25 kilómetros y generalmente son ciclónicos en el hemisferio Norte y anticiclónicos en el hemisferio Sur. Así según (Munk, 2001), los vórtices ciclónicos son más estables que los anticiclónicos.

Debido al efecto de la Circulación de Langmuir (ver apartado 2.3.3), en la superficie del mar en las zonas de convergencia vertical se acumulan las algas, zooplancton y los productos tensoactivos asociados con el ciclo vital de los organismos marinos. En efecto, se desarrolla una micropelícula superficial que disipa las ondas capilares pequeñas, lo que permite detectar estas franjas de convergencia en mesoescala mediante las imágenes del SAR como las zonas de las franjas negras paralelas (estructuras alongadas que pueden alcanzar varias docenas de kilómetros) o ya transformadas y derivadas bajo la intervención de los fenómenos hidrometeorológicos (corrientes marinas, giros, efectos de disipación, oleaje, viento, etc.). Las franjas de convergencia se manifiestan como los trazadores naturales en la superficie marina. Su detección y seguimiento permite cuantitativamente y cualitativamente evaluar la dinámica marina en mesoescala.

En el Mediterráneo Noroccidental los remolinos y filamentos espirales han sido detectados *in situ* o por observación remota mediante diferentes proyectos de investigación. En el artículo de Tintorè et al. (1990) se muestran los resultados de la detección mediante imágenes de satélite en infrarrojo y medidas *in situ* de los remolinos anticiclónicos de aguas frías y poco saladas (respecto a las ambientales) en el límite de la plataforma continental cerca de Barcelona. En el mismo trabajo se calcula mediante los datos obtenidos *in situ* y el “método dinámico” de la estimación de la velocidad de corriente geostrófica (respecto a una profundidad de 200 m), la velocidad característica (~20 cm/s) de la rotación anticiclónica de un típico vórtice detectado. También con la monitorización mediante satélite de cuatro días del desplazamiento de un frente de aguas frías se calcula la velocidad media de su desplazamiento a lo largo de la costa de Barcelona que alcanza unos 25 cm/s.

En la campaña PRIM-1 (Mayo de 1992) las trayectorias de las boyas en deriva claramente indicaron la existencia de un remolino en mesoescala al Sur del Cabo Creus (Font et al., 1993). En el mismo trabajo indican un dipolo detectado mediante imagen del SAR (20 de noviembre de 1991) entre las Islas Mallorca y Menorca.

Durante la realización del proyecto MECA 93 (Rojas et al., 95) el día 17 de junio de 1993 mediante imágenes del SAR se detectaron los vórtices ciclónicos del diámetro de 5 Km al suroeste de los cañones submarinos Blanes y Palamòs y del diámetro de 20 Km situado al norte del Golfo de Roses. También las formas circulares de las trayectorias de las boyas en deriva muestran la existencia de un gran vórtice de carácter anticiclónico cerca de la Costa Brava. Los autores (Rojas et al., 95) suponen que las aguas relativamente frías y de baja salinidad procedentes del Golfo de León son responsables en la creación de los campos de los gradientes horizontales de la densidad y de los flujos locales detectados en

la plataforma continental. La interacción entre estos flujos y compleja topografía del fondo (los cañones submarinos) tiene un papel principal en la formación de las corrientes costeras y los remolinos. No obstante, la circulación de los vórtices desde la plataforma continental hacia alta mar está asociada con el transporte de material en suspensión (clorofila y especies de plancton) (Tintorè et al., 1990).

En esta tesis se presentan los resultados de los estudios realizados mediante el proyecto *Clean Seas* a partir de imágenes obtenidas en el período comprendido entre 1996 y 1998 en el Mar Balear en la zona entre el Delta del Ebro, el Cabo de Creus y la Isla de Mallorca (figura 4.3.1). Esta área posee una hidrodinámica compleja y presenta una gran diversidad de fenómenos oceanográficos, incluyendo mezcla costera, frentes, ondas internas y aspectos de turbulencia bidimensional y tridimensional (como vórtices, remolinos, ondas) en un extenso rango de escalas. No obstante, el área marítima en las proximidades de Barcelona tiene un alto grado de contaminación marina (ver figura 4.1.1), lo que llama la atención y aumenta el interés de estudiar la dinámica superficial de esta zona.

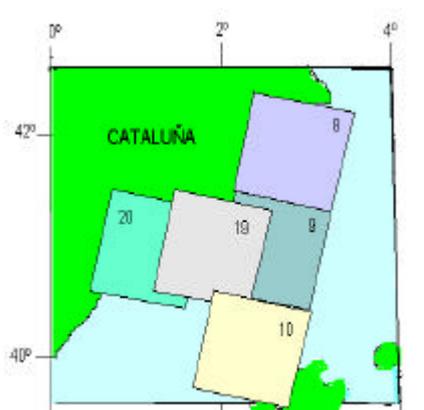


Figura 4.3.1. Indicación de los “frames” utilizados en la zona estudiada (ver figura 3.1.2)

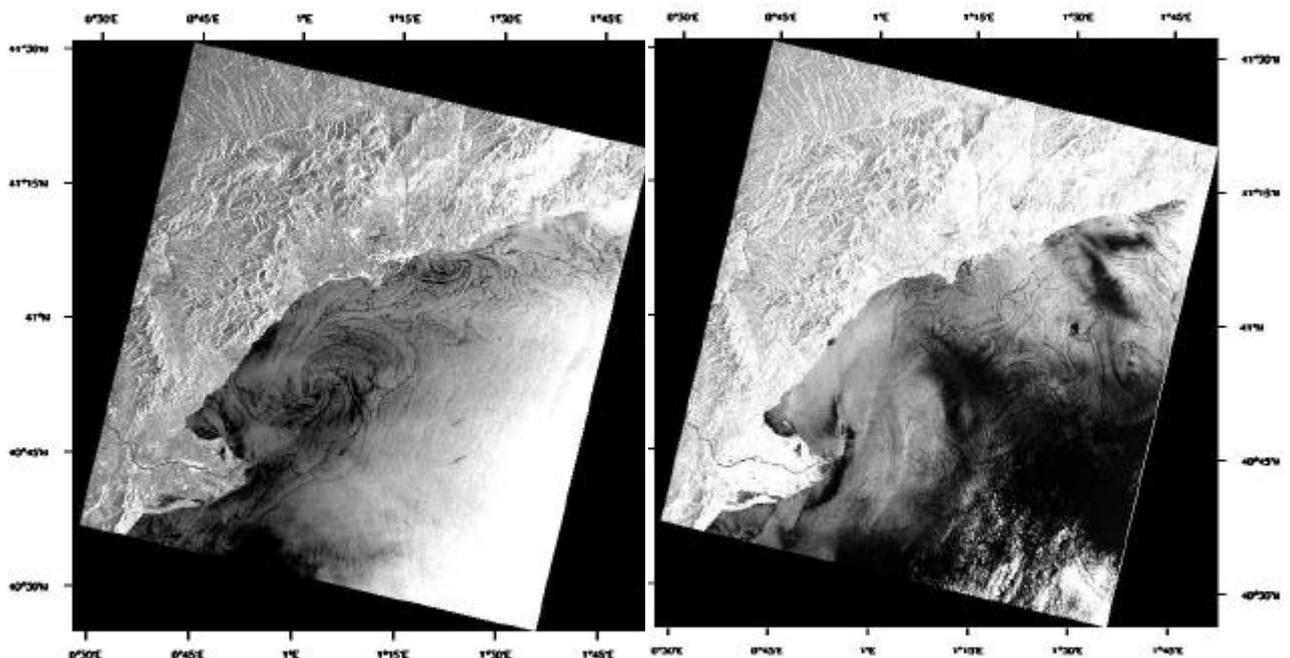


Figura 4.3.2. Imágenes del SAR (ERS-2) del 27.08.97 (izquierda) y del 01.10.97 (derecha) de la misma zona a NE del delta del Ebro. Se observan los filamentos dinámicos y vórtices del tamaño de decenas de kilómetros.

4.3.2. Detección y análisis de los vórtices

Para detectar los vórtices y las escalas asociadas a los movimientos superficiales en el mar, fueron analizadas las 81 imágenes del SAR del ERS-1/2 de las cinco cuadrículas del tamaño 100 Km por 100 Km cada una mostradas en la figura 4.3.1 obtenidas mediante el proyecto *Clean Seas* en los años de 1996 a 1998. En la figura 4.3.2 (izquierda) se observan los vórtices en la zona entre el delta del Ebro y Barcelona; en la figura 4.3.3 al frente de la Costa Brava y de Maresme se observa un dipolo. También se puede ver restos de derrames de petróleo en forma de estelas transformadas mediante los procesos dinámicos.

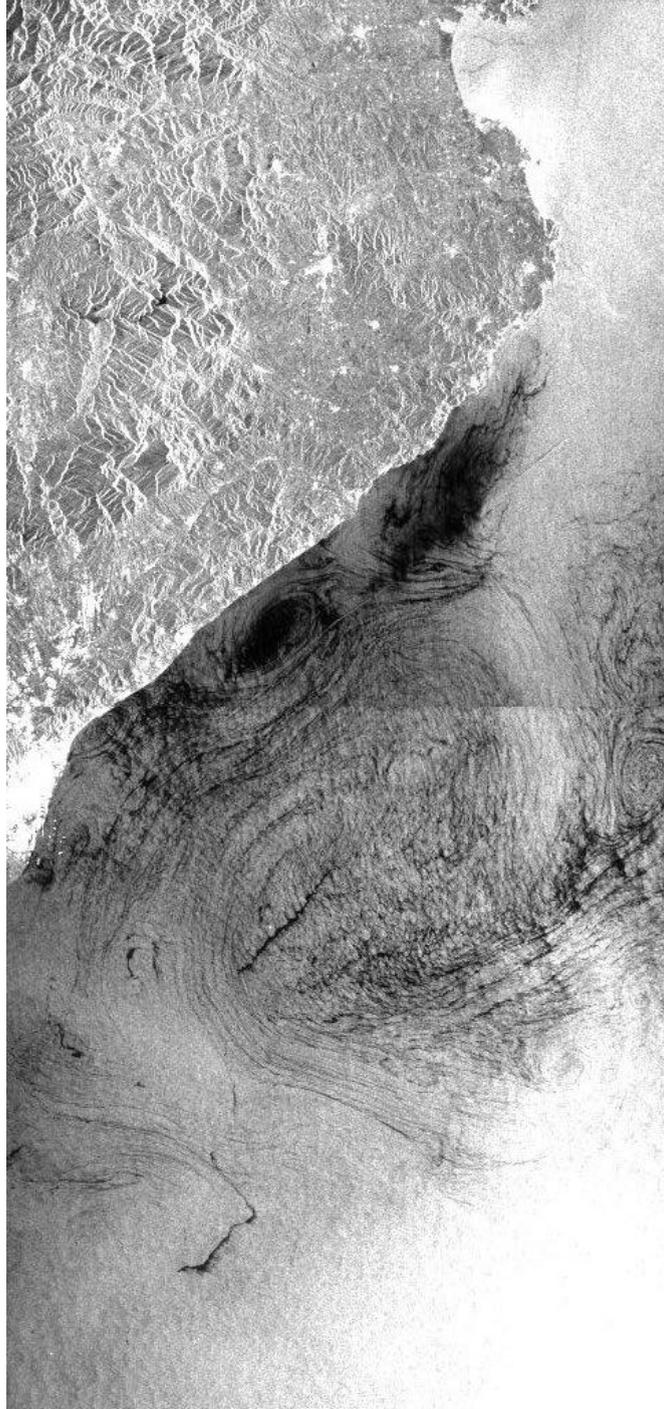


Figura 4.3.3. Dos imágenes del SAR superpuestas (100x200 Km) del 24.08.97 del área cerca de Barcelona.

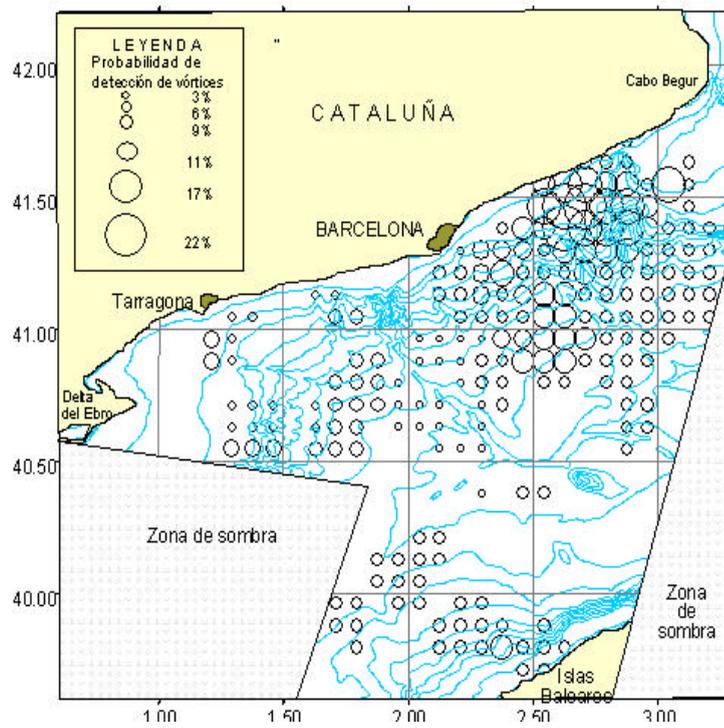


Figura 4.3.4. Probabilidad (número normalizado por las observaciones efectuadas) de la detección de estructuras en forma de vórtices.

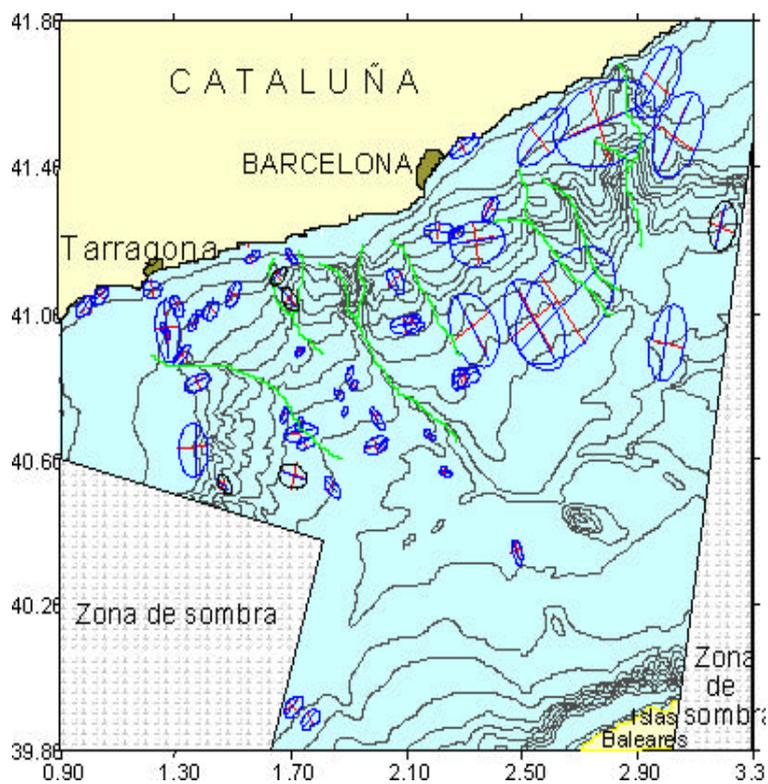


Figura 4.3.5. Los cañones submarinos (líneas verdes) y los vórtices claramente detectados en el período 1996-1998 cerca de Barcelona.

La figura 4.3.4 muestra la probabilidad (número normalizado por las observaciones efectuadas) de la detección visual de estructuras en forma de vórtices registrados en los cuadrantes de 5' x 5' en sistema de coordenadas geográficas. Se ve bien que la mayor densidad de vórtices se observa al Este de Barcelona en el área cercana al cañón submarino de Blanes. Otras áreas con concentración relativamente alta de vórtices son hacia el Sudeste y Sudoeste de Barcelona y al Sur y Sur - Sureste de Tarragona, al Oeste-Noroeste de las Islas Baleares.

La figura 4.3.5 muestra la posición, la forma y la orientación espacial de 56 remolinos elípticos detectados en las diferentes imágenes SAR durante el período de observaciones. Para visualizar mejor la estructura batimétrica del fondo marino, los ejes "thalwegs" de los cañones submarinos han sido marcados con líneas verdes. La mayoría de los vórtices están situados en una franja marítima relativamente cercana a la costa continental. Aún mas, se nota una correlación entre las posiciones espaciales de los remolinos y los cañones submarinos: la mayoría de los vórtices están situados al lado izquierdo de los cañones submarinos. La orientación espacial de las elipses ajustadas a los vórtices fue determinada mediante el ángulo entre la dirección Norte y la dirección del eje mayor.

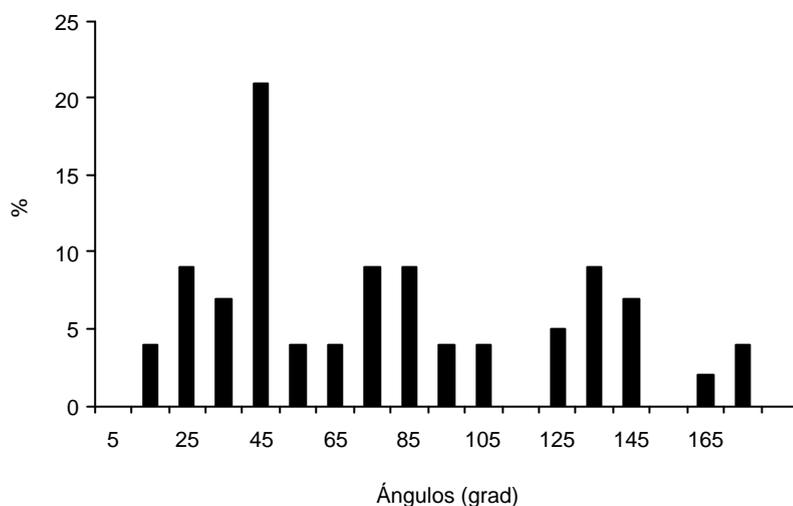


Figura 4.3.6. Histograma normalizado de los vórtices en función de los ángulos entre la dirección norte y la dirección de sus ejes mayores (en el sentido de las agujas del reloj).

La figura 4.3.6 muestra la proporción de los vórtices y las direcciones de sus ejes.

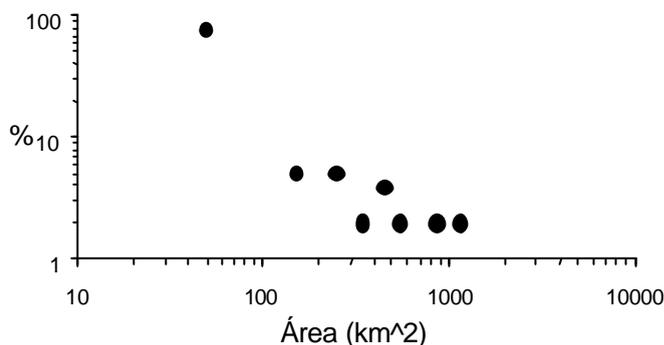


Figura 4.3.7. Histograma normalizado de los vórtices detectados en función de sus áreas.

Debido a la distribución binormal observada consideramos que existen dos tipos de mecanismos orientadores de los vórtices:

- Dinámico, debido a la influencia de la corriente Liguro-Provenzal (cerca de 50% de vórtices detectados tienen el ángulo de la orientación entre 25° y 75° , figura 4.3.6).
- Batimétrico, por causa de la influencia de los cañones submarinos orientados perpendicularmente a la línea de la costa (el 25% de los casos los vórtices detectados tienen ángulos azimutales entre 125° y 145°).

Allen (1988) demostró teórica y experimentalmente la deflexión hacia mar adentro de vórtices baroclinos costeros al encontrar una diferencia de profundidad y Chen y Allen (1996) detallan la influencia de las características del cañón submarino en el flujo transversal a la costa. En el caso del cañón de Blanes, el modelo numérico de Arduin et al.(1999) también muestra la deflexión mar adentro de los vórtices baroclinos. También se han detectado vórtices elípticos parecidos en las corrientes marinas superficiales. Sus fuertes dependencias de batimetría local (por ejemplo en la zona del cañón submarino *del Foix* que está situado al Suroeste de Barcelona), fueron detectadas en la campaña MEGA 93 (Rojas et al.,1995), y en modelos numéricos de la zona (Canals et al., 1997). En Arnau (2000) se presentan diversas estructuras definidas de los vórtices en esta zona detectados mediante imágenes de satélites en infrarrojo IR como se ve en la figura 4.3.8.(1).

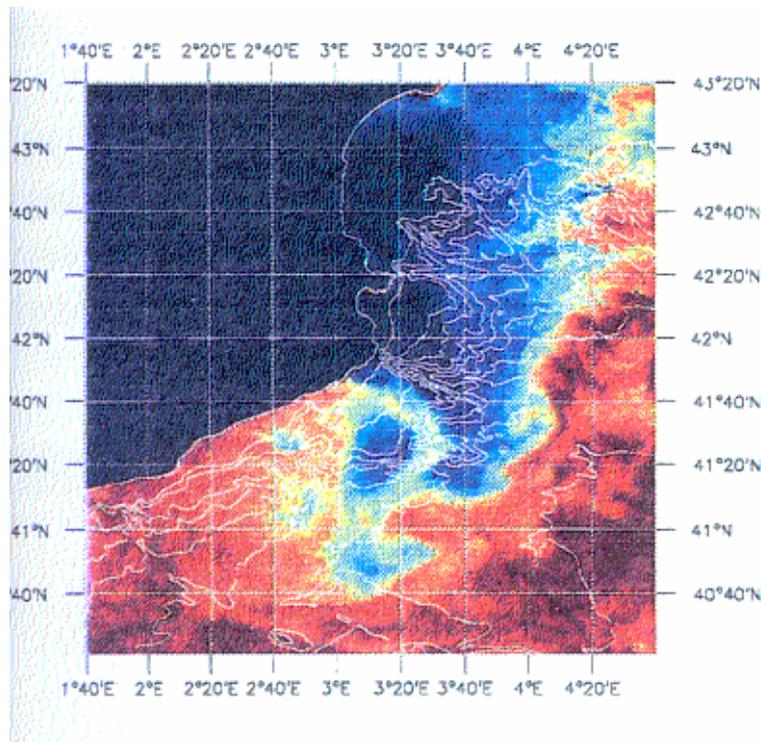


Figura 4.3.8 (1). Imagen térmica de la NOAA /AVHRR del 2 de agosto de 1994. Se advierte la generación de un remolino anticiclónico (centro).

La extensión de la mayoría de los remolinos detectados mediante las imágenes SAR (78 %) es menor de 100 Km^2 . El 18% de remolinos ocupan un área de 100 a 600 Km^2 y solamente el 4% de los vórtices poseen un área significativa: de 800 a 1200 Km^2 (Figura 4.3.7). Cerca de un 60% de vórtices tienen un diámetro menor de 7 Km , un 21% lo tienen entre 8 y 20 Km y un 16% entre 21 y 44 Km (Figura 4.3.8 (2)).

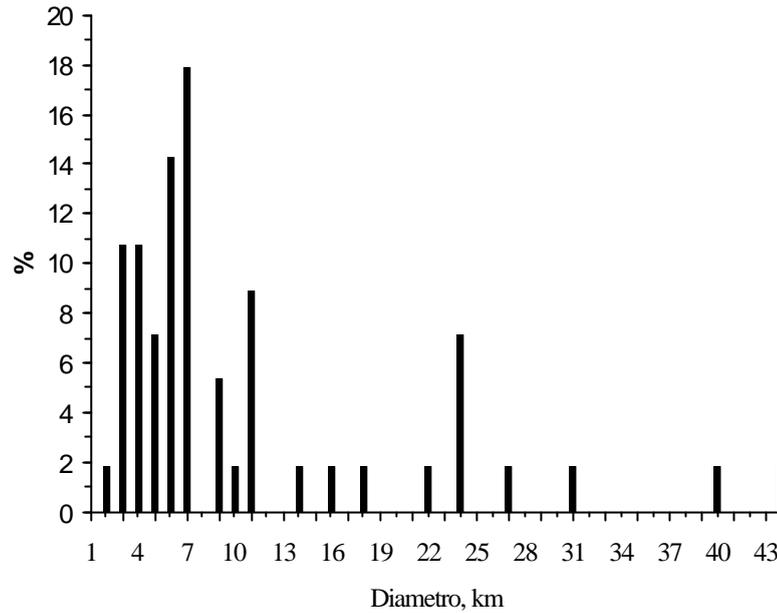


Figura 4.3.8 (2). Histograma normalizado de los vórtices detectados en función de su diámetro mayor.

Consideramos que los vórtices grandes no son estables por dos razones:

a) La estabilidad de los vórtices depende del radio de deformación de Rossby R_D determinado en función de los términos de empuje mediante la frecuencia de Brunt-Väisälä N [s^{-1}] que caracteriza la frecuencia de oscilaciones inerciales verticales de un volumen unitario de agua en la condición de una estratificación estable,

$$N = \left(\frac{g}{r} \frac{\partial r}{\partial z} \right)^{1/2} \quad (4.3.1)$$

y de la frecuencia inercial, dada por el parámetro de Coriolis, $f=2\Omega \sin\varphi$, como:

$$R_D = \frac{N}{f} h \quad (4.3.2)$$

donde h es la escala característica de la profundidad de termoclina. Si la escala del vórtice es mayor que el valor calculado del R_D , éste es inestable y se rompe en otros menores.

b) La vorticidad local a pequeña escala (< 5 Km) generada por la batimetría compleja de la zona así como la fricción costera parece desestabilizar a los grandes vórtices, que son advectados por la corriente Liguro-Provenzal.

Para estimar cual es la magnitud y el área máximas medias estables de los vórtices en diferente temporadas del año en el área de estudio, calculamos los valores promedios de $\bar{\rho}$, $\partial\rho/\partial z$, N así, como la

profundidad máxima de la termoclina a partir de los datos de la base oceanográfica de Levitus94, que incluye los perfiles de temperatura y salinidad del Mediterráneo Noroccidental del 1994 (Levitus, 94).

Tabla 4.3.1. Resultados de cálculo de densidad media, sus gradientes verticales, N y R_D según los datos de la figura 3.4.8.

	$\bar{\rho}$, kg/m ³	$\frac{\partial \rho}{\partial z} \cdot 10^{-2}$, kg/m ⁴	N , s ⁻¹	R_D , m
marzo, h=75m	1028.85	0.6666	0.00797	6200
agosto, h=90m	1027.30	3.8888	0.01930	18000

En la figura 4.3.9 se presenta dos perfiles verticales de la densidad convencional σ_{sp} en kg/m³ [$\sigma_{sp} = \rho$ (kg/m³) - 1000] calculada sobre la base de la temperatura y salinidad media en marzo y agosto de 1994 considerando las profundidades de medida en un punto de alta mar situado a 100 KM aproximadamente al Sudeste de Barcelona. En la figura se ve bien claro la diferencia en la distribución vertical de la densidad en dos épocas de año (verano e invierno). La tabla 4.3.1. muestra que en la época de verano la densidad superficial es menor y su gradiente vertical es mayor que en la época de invierno. En estas condiciones la frecuencia N de las oscilaciones verticales inerciales en la capa superficial (y su espesura) son mayores en verano, lo que hace los vórtices más energéticos y estables. El valor calculado del radio de deformación de Rossby R_D predice la existencia de vórtices estables de tamaño mayor en agosto que en marzo.

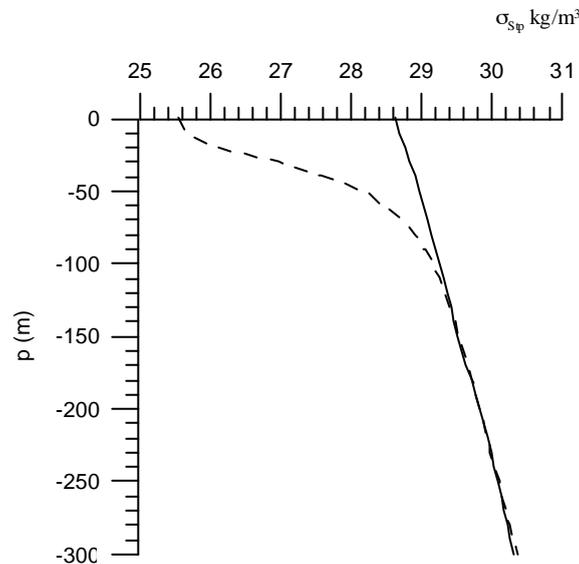


Figura 4.3.9. Distribución vertical media de la densidad convencional σ_{sp} en marzo (línea continua) y en agosto (línea punteada) de 1994 en el Mar Balear ($\alpha=40.5^\circ$ N, $\lambda=2.5^\circ$ E).

Según nuestros cálculos, el radio de deformación de Rossby o el tamaño máximo típico en la zona de estudio es de orden de unos 20 Km. que nos da un área máxima de los vórtices estables de 300 Km² aproximadamente. Arduin et al. (1999) dan un valor del tamaño de un remolino detectado cerca del

cañón de Blanes de 13 Km, lo que confirma nuestras conclusiones. Si suponemos que el gradiente medio superficial es lineal $\partial\rho/\partial z = \Delta\rho/h$, podemos relacionar el tamaño máximo de los vórtices con la profundidad y estructura de la termoclina. Simplificando la ecuación 4.3.1 y introduciéndola en 4.3.2, obtenemos

$$R_D = \left(\frac{g}{\mathbf{r}} \frac{\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1}{h} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{h}{f} = \frac{g^{\frac{1}{2}}}{f} \cdot \left(\frac{\Delta\mathbf{r}}{\mathbf{r}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot h^{\frac{1}{2}} \quad (4.3.3)$$

Suponiendo que en una zona marina localizada en un período de tiempo la relación entre g y f y el valor de $\Delta\rho$ no cambian mucho, los dos primeros términos pueden ser convertidos en una constante C y obtenemos,

$$R_D = C \cdot h^{\frac{1}{2}} \quad (4.3.4)$$

La expresión 4.3.4 muestra que en estas condiciones simplificadas, la magnitud máxima de un vórtice estable caracterizada por el R_D , depende de la raíz cuadrada de la profundidad de la termoclina h .

Utilizando los datos de la figura 4.3.8 y de la tabla 4.3.1 podemos calcular el valor de la constante C ($C \approx 1900$). Si expresamos h en metros y R_D en kilómetros obtenemos,

$$R_D (km) = 1.9 \cdot \sqrt{h(m)} \quad (4.3.5)$$

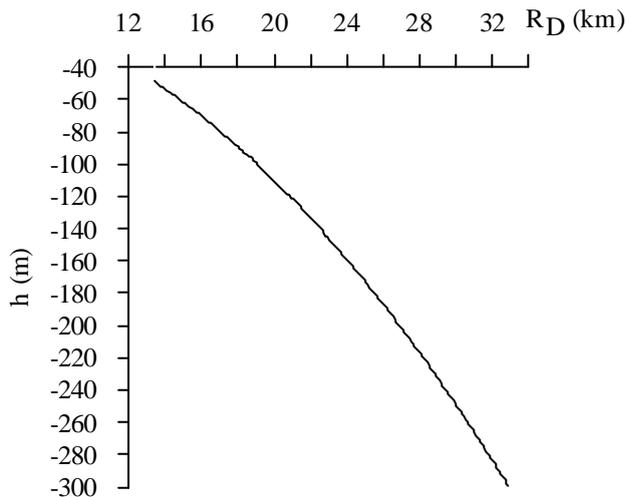


Figura 4.3.10. Radio de deformación de Rossby calculado mediante la ecuación 4.3.5 frente a la profundidad de la termoclina.

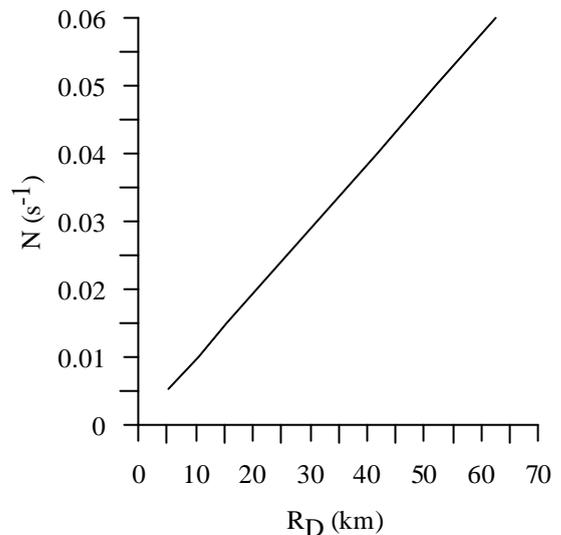


Figura 4.3.11. Radio de deformación de Rossby R_D frente a la frecuencia N ($h=100m$).

La figura 4.3.10 visualiza gráficamente esta dependencia

La figura 4.3.11 muestra otra dependencia importante, es decir entre el radio de deformación de Rossby y la frecuencia de Brunt-Väisälä en la condición de una profundidad fija de termoclina (de unos 100 m) e indica que las fuertes estratificaciones facilitan el desarrollo de los vórtices más grandes. Según la ecuación 4.3.1 la frecuencia N mayoritariamente depende del rango del gradiente vertical de la densidad

de la columna del agua marina. Entonces, la diferencia entre la densidad superficial y máxima en la capa límite, también el espesor de la última, son factores generales que determinan la energía cinética de vórtices, así como también su tamaño.

En cuanto a la forma de los remolinos detectados: la mayoría de ellos tienen una forma elíptica bastante acusada y una relación característica entre los ejes principales a/b que varía entre valores de 0,5 a 1,3 (figura 4.3.12), lo que también confirma que los remolinos de forma elíptica son más estables que los de forma circular (Saffman, 1996).

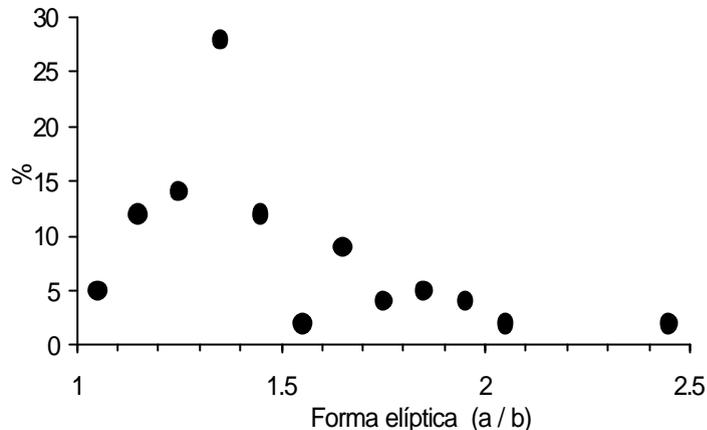


Figura 4.3.12. Histograma normalizado de los vórtices detectados en función de su forma elíptica (a/b).

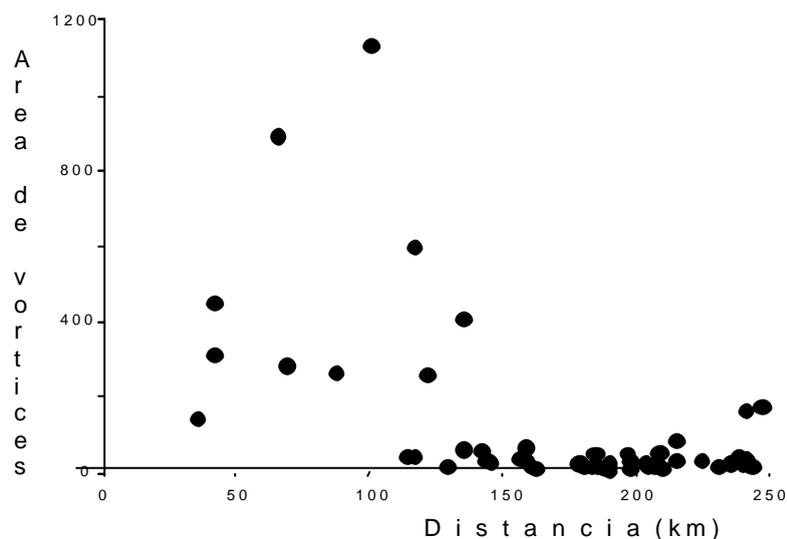


Figura 4.3.13. Distancia entre los vórtices y la normal a la línea dominante de la costa desde Cabo Begur.

4.3.3. Resultados de análisis

La figura 4.3.13 también muestra que los remolinos de mayor área se encuentran al Nordeste del área de estudio. Para confirmar esta dependencia se realizó un análisis cuantitativo representando las áreas de remolinos y las distancias desde una línea normal a la línea general de la costa de Cataluña con el Cabo Begur como origen de referencia.

Estos grandes vórtices cerca del cabo Begur también han sido detectados mediante el seguimiento de boyas trazadoras. Estas fueron usadas tanto en superficie como en profundidad (Rojas et al. 1995) y el

hecho que sólo quedan atrapadas las boyas superficiales indica la poca profundidad de los vórtices, que suelen estar limitados por la presencia de la termoclina (Griffiths y Hopfinger, 1986).

Los remolinos más extensos ($200 - 400 \text{ Km}^2$) están situados predominantemente hacia el NE a una distancia no mayor de $100 - 125 \text{ Km}$. del Cabo Begur (Figura 4.3.13). Esta dependencia puede ser debida a la forma característica de la costa (Cabos Begur y Creus) que desestabiliza la corriente Liguro-Provenzal y crea una circulación adicional a la corriente predominante costera. También tiene un papel importante el frente hidrográfico situado a lo largo de las costas Catalanas en la frontera de la plataforma continental y talud. Este frente existe debido a aguas dulces procedentes de las costas. La salinidad de las aguas costeras es menor de 37.5 pps . y de aguas de mar abierto es mayor de 38.0 pps , lo que forma los gradientes horizontales considerables en la capa superficial y estimula las zonas de mezcla. Nuestros ensayos de laboratorio (Carrillo et al., 2001) de modelación del flujo de agua en interacción con un frente de mezcla en el tanque de $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ mostraron resultados parecidos: la mayoría de los remolinos se encontraban a una distancia de 40 a 65 cm de una pendiente artificial colocada en el tanque para simular el Cabo de Begur (Figura 4.3.14).

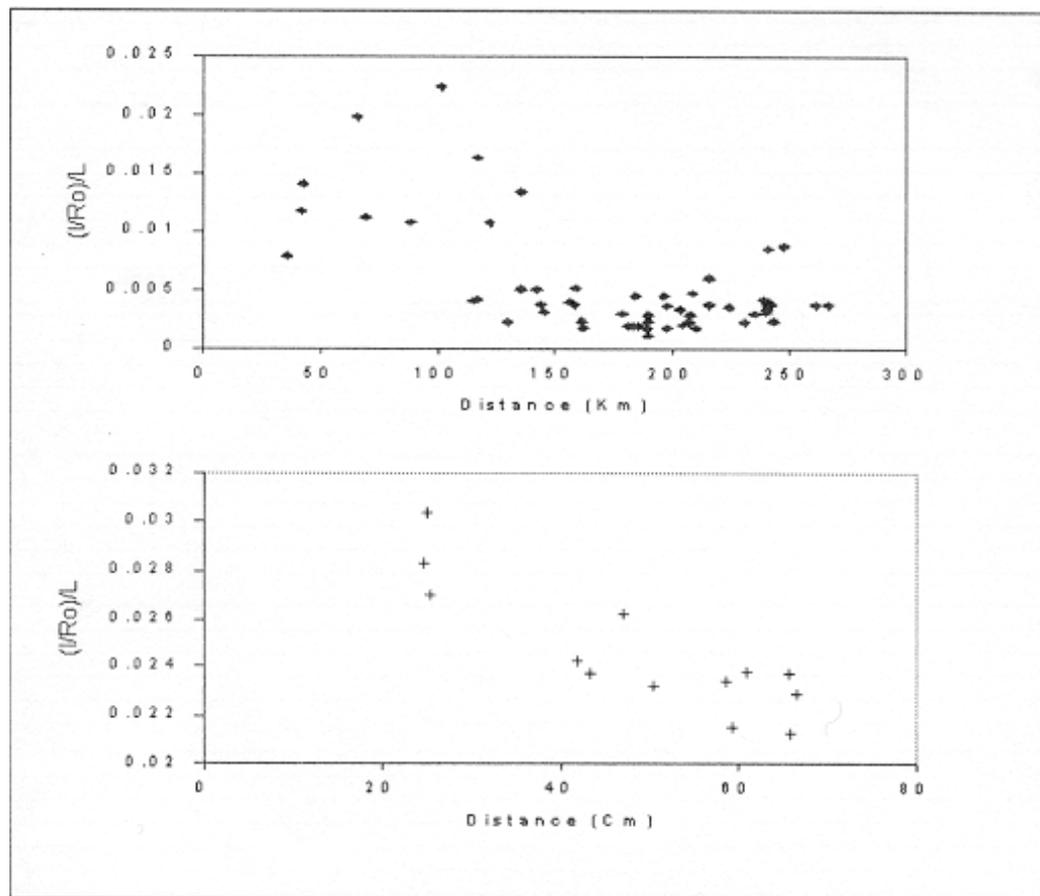


Figura 4.3.14. Distancia (Km) entre los vórtices y la normal a la línea dominante de la costa desde Cabo Begur (arriba) y distancia (cm) entre los vórtices y la pendiente artificial en el experimento en un tanque de $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ (abajo).

La figura 4.3.15 muestra en una serie de imágenes digitalizadas de un experimento de laboratorio cómo se propaga un frente turbulento de mezcla.

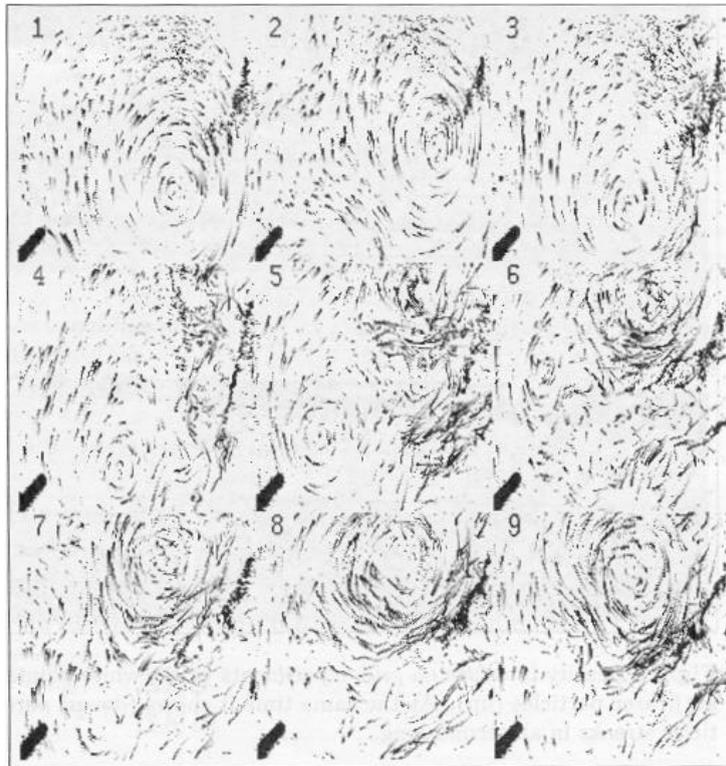


Figura 4.3.15. Serie de imágenes digitalizadas de la propagación del frente horizontal de la mezcla en el experimento de laboratorio en el período de 15 s (dentro de 0, 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 y 15 s correspondientemente).

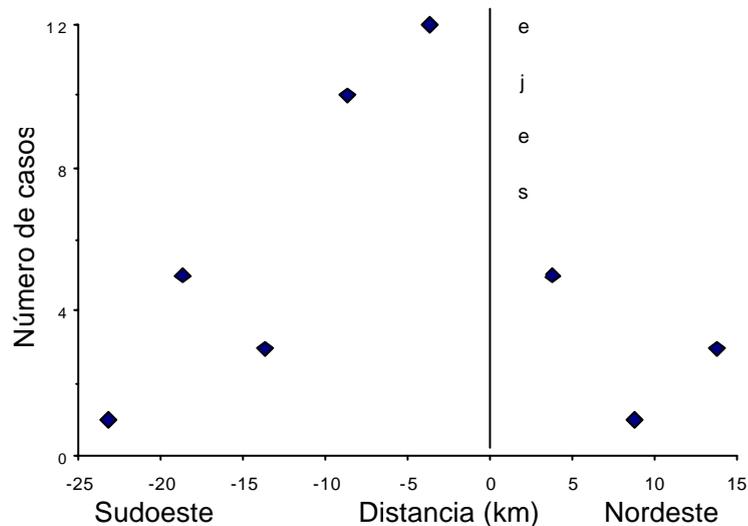


Figura 4.3.16. Distribución espacial de los vórtices respecto a los ejes de cañones submarinos cerca de Barcelona, 1996 - 1998.

También los profundos cañones submarinos, como el de Creus o el de Blanes alejan de la costa los vórtices baroclínicos. (Allen 1988, Arduin et al., 1999), pero su importante papel en la génesis y la dinámica de los vórtices no tiene duda: casi todos los remolinos detectados están situados a una distancia de menos de 90 – 110 Km de la costa. Según nuestros resultados, en alta mar la presencia de los remolinos fue poco frecuente.

Se observa que la mayoría de los vórtices se encuentran al Suroeste de los ejes de los cañones submarinos (figura 4.3.16), siguiendo la dirección de la corriente Liguro-Provenzal. En Masò et al. (1990), indican la existencia de un sistema de los flujos paralelos a las isobatas en los cañones submarinos de la plataforma y talud continental del Mar Balear: hacia tierra en la pendiente Norte de cañón y hacia mar abierta en la pendiente Sur. Puede ser que este movimiento de masa de agua facilita la ruptura y la acumulación de los vórtices sobre la parte Sur de los cañones. La relación entre el número total de remolinos detectados a ambos lados de todos los cañones submarinos en el área estudiada se presenta en la figura 3.4.16. Este comportamiento no está del todo claro aunque existen experimentos de laboratorio donde al afectar la profundidad a la vorticidad potencial, los vórtices generados cerca de la costa sufren un desplazamiento lateral por cambios batimétricos paralelos a la misma (Zatsepin, 1996 y 2001) (figura 4.3.17).

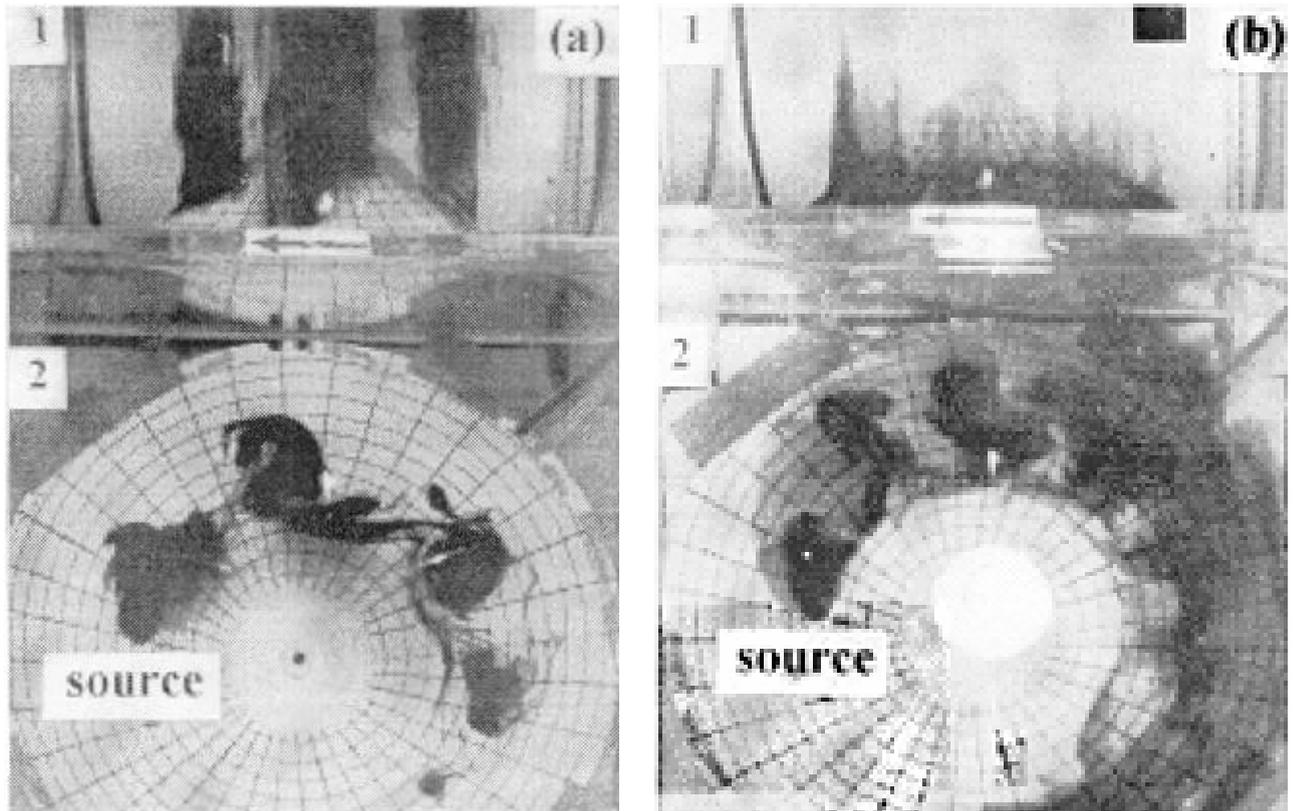


Figura 4.3.17. (a) flujo de vórtices barotrópico casi-periódico inducido mediante una fuente interna al fluido en estado de rotación. 1 – plano vertical, 2 plano horizontal. (b) flujo de vórtices baroclínico casi-periódico inducido mediante una fuente interna al fluido en estado de rotación. 1 – plano vertical, 2 plano horizontal.

[Regresar al Índice](#)

[Seguir](#)