

APLICACIÓN DE LAS IMÁGENES SAR EN EL ESTUDIO DE LA DINÁMICA DE LAS AGUAS Y DE LA POLUCIÓN DEL MAR MEDITERRÁNEO CERCA DE BARCELONA

José M. Redondo, Alexei K. Platonov

Resumen

Se presentan diversas aplicaciones de las imágenes SAR obtenidas de forma sistemática durante los años 1997-1998 en el ámbito del proyecto Europeo Clean Seas, limitándonos al área del NW Mediterráneo cerca de Barcelona. Se detectan con claridad los vertidos de productos petroquímicos, tanto cerca de la costa, como desde las rutas principales de tráfico marítimo. Se puede evaluar la probabilidad de detección de infracciones medioambientales en las distintas áreas. También se presenta un estudio de la detección de vórtices y estructuras dinámicas en la zona litoral catalana, observando que existe una distribución espacial de tamaños que está limitada por el radio de deformación de Rossby. Se confirma la importancia de la batimetría costera y de los cañones submarinos en la dinámica de la zona.

Palabras clave: Imágenes SAR, contaminación marina, derrames, dinámica marina, Mediterráneo Noroccidental.

INTRODUCCIÓN

En el medio marino el volumen de observaciones oceanográficas que se necesitan realizar constantemente para conseguir detectar in situ los fenómenos naturales o los relacionados con las actividades antrópicas es muy grande.

Un método idóneo para investigar la superficie del océano son los datos de los satélites oceanográficos. Las ventajas principales de estos satélites modernos es una gran capacidad de acumular y transmitir informaciones relevantes tanto a meso y a macro escala con periodicidad constante en función de sus órbitas. Los satélites diseñados para las investigaciones del océano pueden detectar concentraciones de clorofila, manchas de petróleo, transporte de sedimentos en las zonas costeras, migración de icebergs, deriva de campos de hielo, etc.

Un gran obstáculo en uso directo y sistemático de las imágenes de satélites es la nubosidad. A pesar de la aplicación de programas específicos en interpretación de imágenes parcialmente cubiertas. Los sensores activos (radar) a frecuencias donde las nubes son transparentes permiten incluso detectar indirectamente las oscilaciones de baja frecuencia de la superficie del mar (marea, flujo y refluo) y las particularidades estructurales de la superficie oceánica, como rugosidad, oleaje y estado del mar en general.

Con los Radares de Apertura Sintética SAR (Syntetic Aperture Radar) a bordo de satélites como SEASAT, RADARSAT, ERS-1 y ERS-2, las posibilidades científicas y las aplicaciones en oceanografía se han ampliado significativamente (Martínez-Benjamin, 1995).

Dep. de Física Aplicada, UPC, C/ Jordi Girona Salgado s/n, Campus Nord, módulo B5, E-08034, Barcelona, España.

J.M. Redondo: Tel. 93-401-7984, e-mail: redondo@fa.upc.es

A.K. Platanov: Tel. 93-401-1831 ó 93-401-6088, e-mail: alexei@fa.upc.es

Artículo recibido el 16 de septiembre de 1999, recibido en forma revisada el 2 de febrero de 2000 y aceptado para su publicación el 24 de marzo de 2000. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

El radar tipo SAR emite la energía en un intervalo pequeño de tiempo y recibe los ecos provenientes de reflexiones de la señal en los objetos dando lugar a una apertura sintética. La resolución acimutal mejora considerablemente al considerarse el efecto Doppler que tiene lugar como consecuencia del desplazamiento del satélite. Los sistemas SAR emiten ondas cortas de unos centímetros. La intensidad de la señal recibida es debida principalmente a la rugosidad a pequeña escala de la superficie. Las imágenes SAR (Figura 1) ayudan a detectar los frentes sinópticos y vientos, las ondas internas atmosféricas y fenómenos naturales como las lluvias, las nevadas, los icebergs, etc. En oceanografía física las imágenes SAR permiten detectar características topográficas del fondo marino en aguas someras como una expresión de las mismas en la superficie acuática. También se detectan la presencia de ondas internas, corrientes marinas superficiales, frentes oceánicos y vórtices, todo esto gracias a los cambios naturales de rugosidad de la superficie marina relacionados con las alteraciones en las ondas capilares y como resultado el cambio de la retroreflectancia de la superficie acuática.

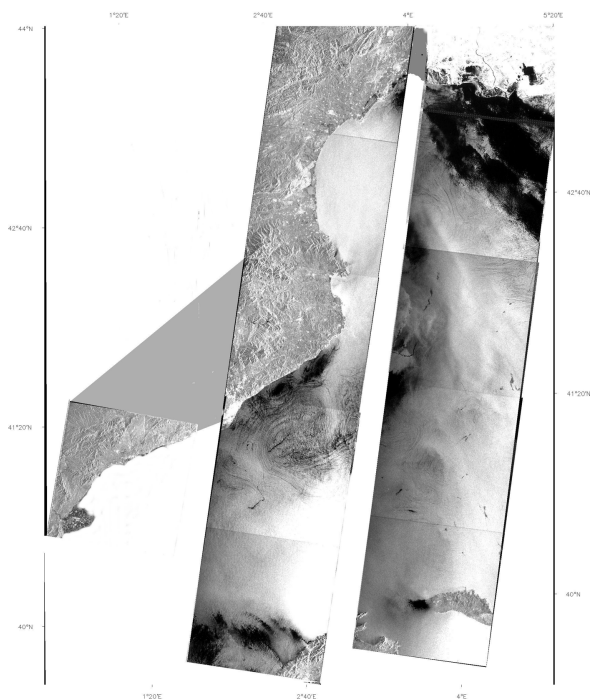


Figura 1. Composición de imágenes SAR durante Agosto de 1997 en el Mediterráneo Noroccidental.

En este trabajo se aplican diversas imágenes SAR en la detección en las zonas costeras de los penachos producidos en emisarios, de polución industrial llevada por los ríos hasta el mar o por los sistemas de drenaje urbanos. También se pueden

detectar las manchas o derrames de petróleo provocados por accidentes en barcos o plataformas petrolíferas o simplemente por unas limpiezas clandestinas de los tanques de los barcos en alta mar.

Un análisis cualitativo y cuantitativo de imágenes SAR, libres de la interferencia de las nubes, usando un programa específico de procesamiento de imágenes, permite reconstruir correctamente algunos procesos atmosféricos y oceánicos superficiales.

En el ámbito de las investigaciones del Proyecto de la Unión Europea Clean Seas, este trabajo estudia imágenes SAR, ampliando los conocimientos de la dinámica superficial de la zona marina de NW Mediterráneo y realiza un análisis estadístico empírico de vertidos de contaminantes durante los años 1997 - 1998 (Gade y Redondo, 1999). También se pueden utilizar las imágenes SAR para una mejor caracterización de los procesos dinámicos en las zonas costeras y en alta mar, presentando un estudio estadístico de los vórtices detectados durante dos años en la zona litoral próxima a Barcelona.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA ESTUDIADA

La zona marina del NW Mediterráneo analizada se localiza al Este de las costas de Cataluña y esta situada entre el Cabo de Creus, las Islas Baleares y el Delta del Ebro.

La topografía del fondo marino es bastante

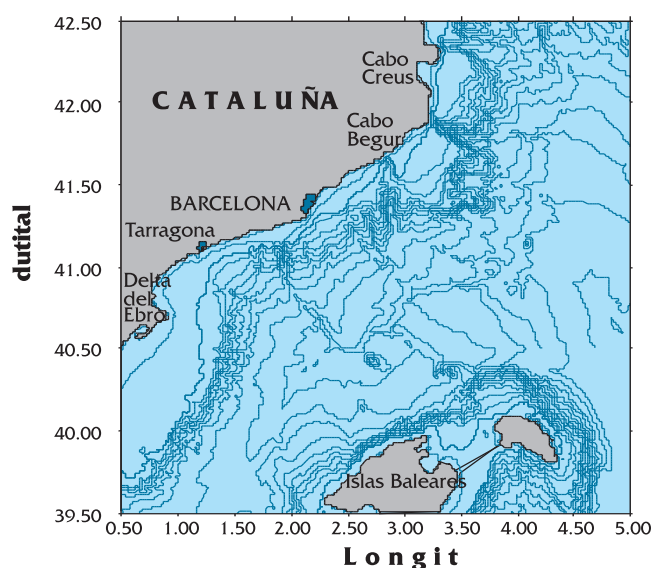


Figura 2. Mapa batimétrico de la zona estudiada (isobatas de 0, 100, 200, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2200, 2400, 2700, 2800 m)

complicada. Con una estrecha plataforma continental en el norte de la región y cerca de las Islas Baleares y una zona relativamente amplia de la misma en el sur cerca del Delta del Ebro, ambas están penetradas por numerosos cañones submarinos. Las profundidades máximas son aproximadamente de 2.800m según se ve en la Figura 2.

En la circulación superficial de las aguas, predomina el flujo ciclónico formado por la Corriente Liguero-Provençal-Catalana que se propaga a lo largo de las costas de Cataluña y Valencia y sus ramas, que en la latitud de Cabo de la Nao, viran hacia las Islas Baleares.

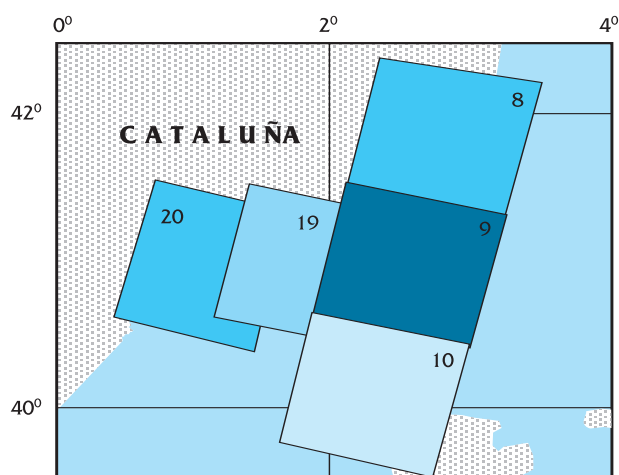


Figura 3. Área de cobertura de imágenes SAR (Zonas 8, 9, 10, 19 y 20)

En este trabajo se contó con 282 imágenes SAR de la zona del Mediterráneo noroccidental incluyendo el Golfo de León, de todas las imágenes, se presenta aquí el análisis de 81 imágenes SAR (13 a 16 imágenes SAR para cada zona) obtenidas con una periodicidad de 35 días durante los años 1997 y 1998.

La región investigada (Figura 3), con una hidrodinámica compleja, 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.

También se detectan en las imágenes SAR diversos aspectos de la contaminación tanto en el litoral de Cataluña como en alta mar.

Los penachos detectados cerca de la costa se deben principalmente a focos de contaminación constante como son los deltas de los principales ríos

regionales: Ebro, Llobregat, Besós, etc., cuyas aguas incluyen productos químicos industriales, pesticidas y fertilizantes agrícolas o los emisarios submarinos cerca de las ciudades costeras.

En cuanto a la zona de alta mar, se observa muy bien mediante el análisis de las imágenes SAR, principalmente en las rutas marítimas, que los petroleros aprovechan para limpiar sus tanques en alta mar vertiendo los productos petroquímicos residuales al medio marino.

MONITORIZACIÓN MEDIOAMBIENTAL Y DETECCIÓN DE MANCHAS DE PETRÓLEO Y PENACHOS DE AGUAS CONTAMINADAS.

Las trazas de materia orgánica en la superficie marina, con propiedades tensioactivas, producen una disminución local de la rugosidad de la superficie del mar debida principalmente al viento, que se reflejan en una menor reflectividad de la señal detectada por el SAR.

Estas zonas más oscuras visibles en las imágenes pueden ser de carácter natural, como son los productos del ciclo vital biológico de especies marinas. También se detectan como manchas oscuras las trazas de petróleo relacionadas con la limpieza de los tanques de barcos o las explotaciones petroleras de las plataformas marinas.

Estas manchas o penachos oscuros en las imágenes SAR, son independientes de las condiciones de iluminación solar y de cobertura por nubes, sin embargo el posible contraste depende fuertemente de la velocidad del viento (Gade y Alpers 1999).

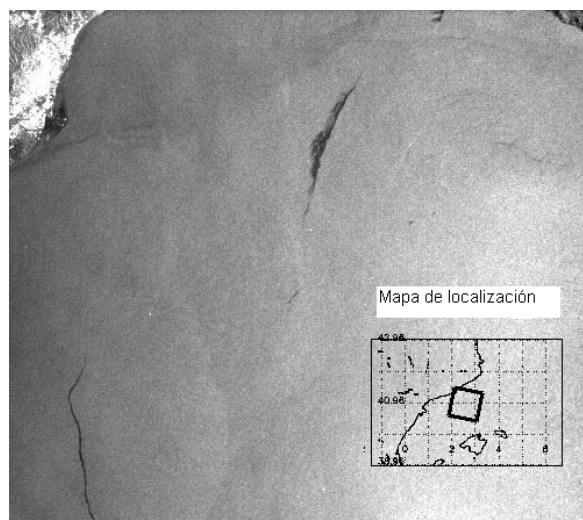


Figura 4. Imagen SAR de ERS-2 de 5 de julio de 1998 a las 10:35 UTC con vertidos típicos cerca de Barcelona.

El análisis visual de las imágenes obtenidas por el ERS-1/2 permite detectar fácilmente las manchas recientes de petróleo por su topología específica, que se puede apreciar como una línea recta o doblada suavemente (Figura 4).

A veces, incluso, se puede observar los petroleros como puntos brillantes situados en mar abierto, derramando en su camino productos petroquímicos (Figuras 5a y 5b).

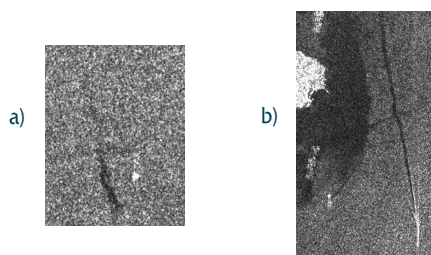


Figura 5. Imágenes RADARSAT de 21 de enero de 1998 a las 18:19 UTC. a) Pequeño vertido, el punto brillante es un barco. b) Típico vertido por un petrolero donde se aprecia su estela.

Los derrames orgánicos naturales de diverso origen (planktónico, por algas o por emisiones de hidrocarburos naturales) forman unas complicadas estructuras en la superficie marina ligadas a los procesos dinámicos de la zona. Son productos de la vorticalidad: remolinos, giros, o de la cizalladura producida por corrientes, frentes, etc. (Figura 6). Habitualmente en este fondo natural turbulento de la superficie acuática no es difícil detectar manchas

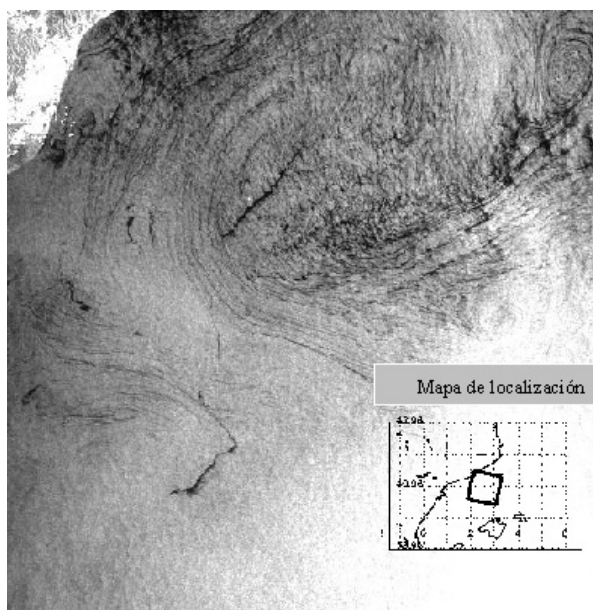


Figura 6. Imagen SAR de ERS-2 de 24 de agosto de 1997 a las 10:30 UTC de una combinación de estructuras naturales de tipo vórtice y de vertidos cerca de Barcelona.

recientes de petróleo mediante un contraste topológico (Gade y Redondo, 1999). Para discriminar entre las manchas de petróleo antrópicas y las naturales se determina la dimensión fractal de diversos contornos de reflectividad SAR y se comprueba de forma sistemática que estas últimas tienen dimensiones fractales con valor próximo al característico del ambiente turbulento.

Para realizar el presente análisis fueron utilizadas las cinco posiciones fijas (zonas indicadas en la figura 3) de recepción de imágenes SAR en un dominio de 10x10 (áreas de cobertura de los satélites ERS-1 y ERS-2 de la Agencia Espacial Europea) de la zona marina entre Cabo Creus y el Delta del Ebro.

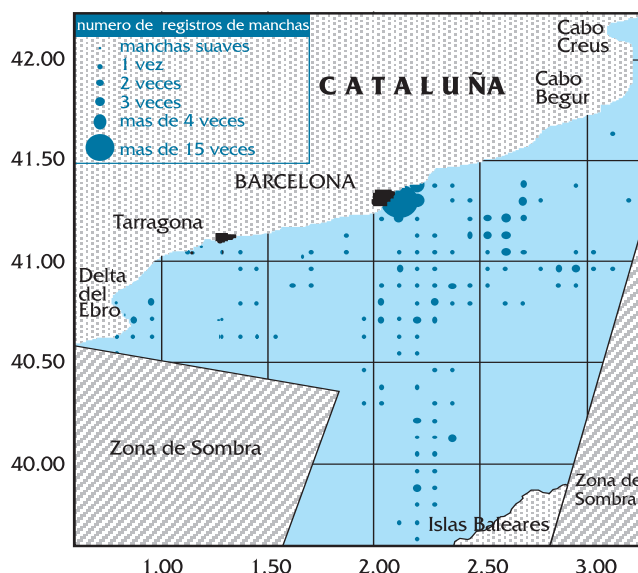


Figura 7. Número total de manchas registradas en un dominio de 5' (5' en período 1997 - 1998 cerca de Barcelona.

Metodología y visualización de los resultados.

Para facilitar la detección y el análisis estadístico de la frecuencia de manchas de petróleo y de los penachos de aguas residuales, el área marina de cada zona (Nº 8-10, 19 y 20 de la figura 3) fue dividida mediante una red de coordenadas geográficas en recuadros de 5' x 5'. En cada uno de los recuadros fueron identificadas, contadas y digitalizadas las manchas superficiales de petróleo de forma visual.

Basándose en los datos del período estudiado se presenta en la Figura 7 la distribución de las detecciones de manchas de petróleo y de penachos costeros.

Como distintas zonas tenían distinto número de observaciones, se han normalizado las manchas detectadas como el número de casos dividido por número de las observaciones/imágenes efectuadas en cada recuadro (Figura 8). Este número normalizado de casos de contaminación frente a las observaciones caracteriza la probabilidad de detección de productos petroquímicos en las distintas zonas.

La zona del litoral de Cataluña tiene el mayor número de casos detectados de contaminación acuática. En más de 50% de las observaciones se detecta polución cerca de Barcelona (Figura 8).

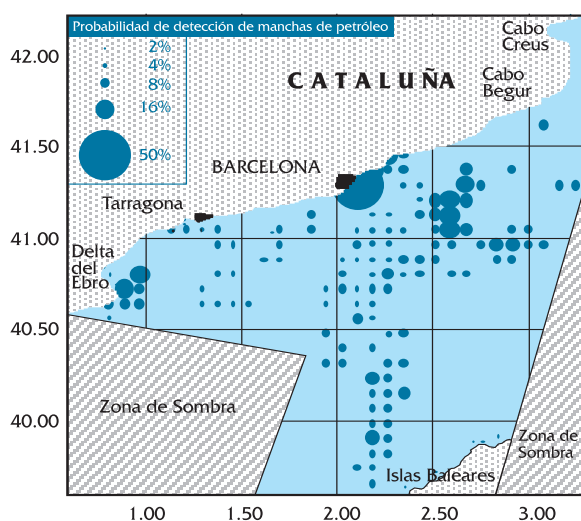


Figura 8. Probabilidad de detección de manchas de petróleo en el periodo de 1997 - 1998 cerca de Barcelona.

En segundo lugar está el Delta del Ebro y las áreas cercanas (más de 20% casos registrados), y la zona del litoral de Tarragona.

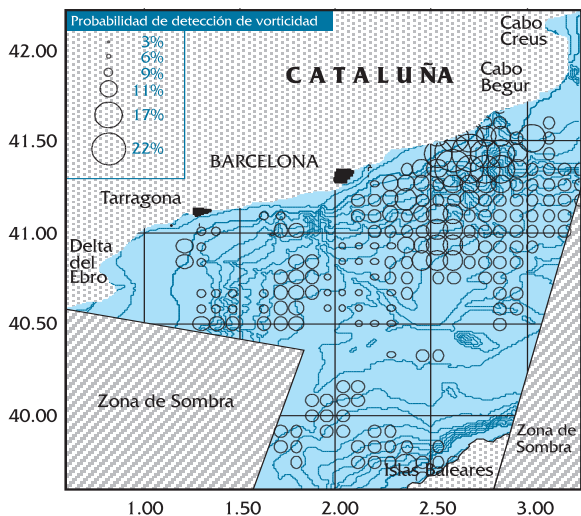


Figura 9. Probabilidad de detección de estructuras en forma de vórtice detectadas en periodo de 1997 - 1998 cerca de Barcelona.

En cuanto al mar abierto: se notan muy bien, por la cantidad y la disposición de las manchas detectadas, las rutas marítimas habituales por los petroleros en las direcciones: NE - SO y entre Barcelona - Islas Baleares (hasta 16% de casos) (Figura 8).

Es probable que tal muestra de actividades ilegales de contaminación en la superficie del mar también esté relacionada con la hora habitual del paso de satélites (10 h 30 m UTC), la limpieza de los tanques y sentinas se realizan usualmente por la noche y las manchas de petróleo son recientes a la mañana siguiente y su difusión no es excesiva, por esto se detectan con facilidad mediante imágenes SAR. La extensión de las manchas, así como el tipo de petróleo y la intensidad del viento son los factores dominantes que afectan la persistencia de las manchas. Si el viento es alto la detección de las manchas de petróleo es más difícil debido a dos razones distintas, la primera es que para vientos mayores de 10 m/s hay una saturación de la señal SAR debido a la fuerte rugosidad superficial, la segunda razón es que la vida media de las manchas es mucho menor debido a la mayor difusividad turbulenta y la probabilidad de su detección disminuye. Se presenta un estudio más detallado de la detección de derrames de petróleo en Gade y Redondo (1999) y Gade y Alpers (1999).

Detección de vórtices.

Para detectar los vórtices y las escalas asociadas a los movimientos superficiales en el mar, fueron analizadas las mismas 81 imágenes de las cinco zonas mostradas en la figura 3 (años 1997-1998). La figura 9 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'. 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 (hacia el Sudeste y Sudoeste de Barcelona y al Sur y Sur - Sudeste de Tarragona, al Oeste-Noroeste de las Islas Baleares).

La figura 10 muestra la posición, la forma y la orientación espacial de 56 remolinos elípticos detectados en las diferentes imágenes SAR durante el periodo de observaciones. Para visualizar mejor la estructura batimétrica del fondo marino, los "thalwegs" de los cañones submarinos han sido marcados con líneas verdes. La mayoría de los vórtices están situados en una franja marítima relativamen-

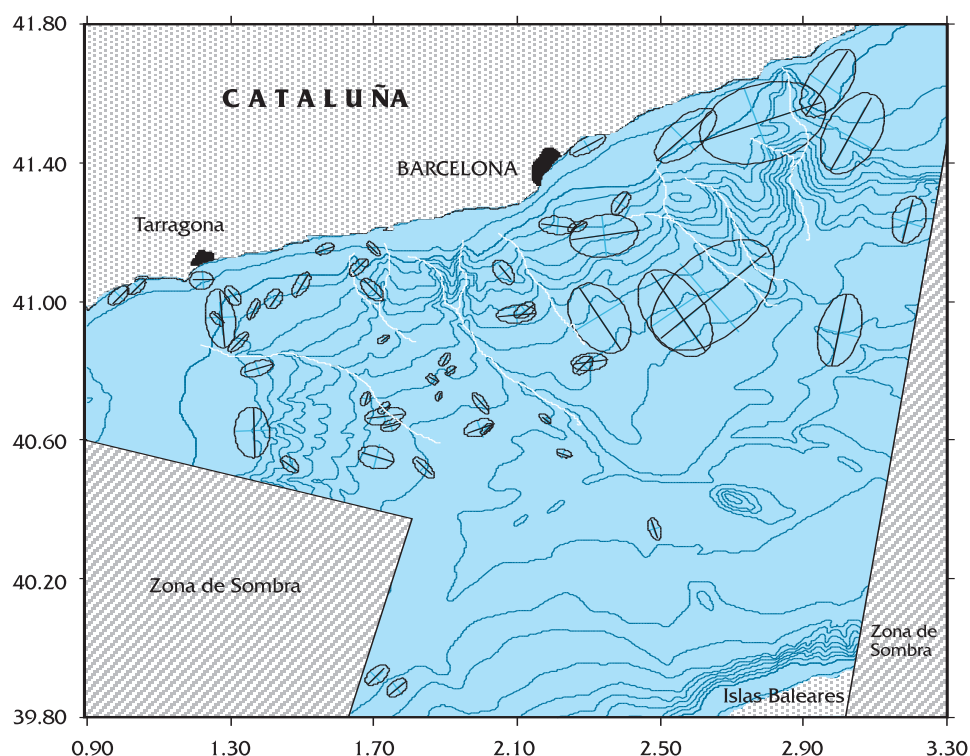


Figura 10. Los cañones submarinos (líneas verdes) y los vórtices detectados en el período 1997-1998 cerca de Barcelona.

te 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. La figura 11 muestra la proporción de los vórtices y las direcciones de sus ejes.

Debido a la distribución binormal 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°).

Batimétrico, por causa de la influencia de los cañones submarinos orientados perpendicularmente a la línea de la costa (en 25% de los casos los vórtices detectados tienen ángulos acimutales entre 125° y 145°).

Allen (1988) demostró teórica y experimentalmente la deflexión hacia mar adentro de vórtices baroclinos costeros al encontrar una diferencia de

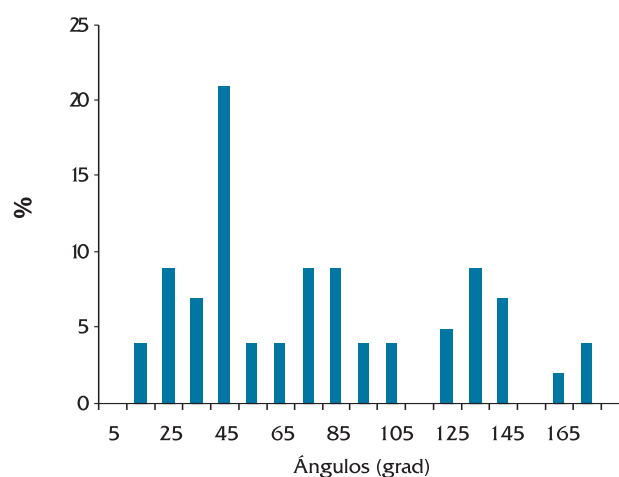


Figura 11. Histograma normalizado de los vórtices en función de los ángulos entre la dirección norte y la dirección de sus ejes mayores (en el sentido de las agujas del reloj).

profundidad y en Chen y Allen (1996) se detalla 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 Sudoeste de Barcelona), fueron detectadas en la campaña ME-GA 93 (Rojas et al., 1995), y en modelos numéricos de la zona (Canals et al. 1997).

La extensión de la mayoría de los remolinos (78 %) es menor de 100 km².

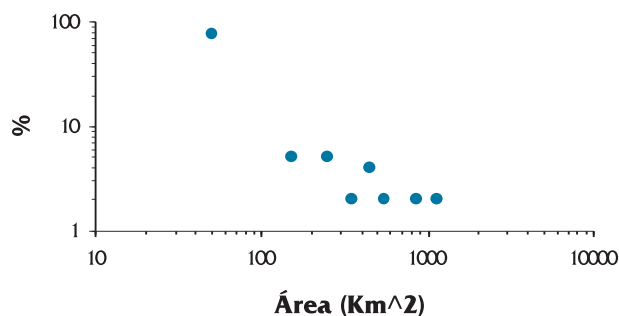


Figura 12. Histograma normalizado de los vórtices detectados en función de sus áreas.

El 18% de remolinos ocupan un área de 100 a 600 km² y solamente el 4% de los vórtices poseen un área significativa: de 800 a 1200 km² (Figura 12).

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

a) La estabilidad de los vórtices depende del radio de deformación de Rossby determinado en función de los términos de empuje mediante la frecuencia de Brunt-Väisälä N y de la frecuencia inercial, dada por el parámetro de Coriolis, f , como:

$$R_D = \frac{N}{f} h$$

donde h es la profundidad característica de la termoclina. Si el radio 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-Provençal.

Para estimar cuál es el área máxima de los vórtices, calculamos los valores promedios de N y f así como la profundidad máxima de la termoclina que es de unos 100 m. Los valores de h y N se calcularon a partir de los datos superficiales

($h < 100$ m) de la base de datos oceanográfica LEVITUS, que incluye los perfiles de densidad medidos en 1994 (LEVITUS, 1999).

El radio de deformación de Rossby típico calculado en la zona es de unos 20 km, que nos da un área máxima de los vórtices estables de 1500 km². Arduin et al. (1999) dan un valor para el cañón de Blanes de 13 km. Podemos interpretar también un mecanismo análogo de ruptura de vórtices, a partir de un número de Rossby, definido como la relación entre la vorticidad a pequeña escala ω y a gran escala Ω ($\Omega = \nabla \times U$):

$$Ro = \frac{\omega}{\Omega} = \frac{U}{f.l}$$

También podemos considerar como representativa a la vorticidad local, (calculada en función de la velocidad cuadrática media como $\omega = \nabla \times u'$, siendo la velocidad u' característica de la turbulencia bidimensional observada en superficie y de la escala integral de la turbulencia l , de forma que $\omega = u'/l$. Si tomamos la velocidad media de la corriente Liguro-Provençal como 0.2 m/s a la escala de los remolinos más energéticos (escala integral), el número de Rossby en la zona del cañón de Blanes es aproximadamente de $Ro = 0.2$.

En cuanto a la forma de los remolinos detectados: la mayoría de los vórtices 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 13), lo que también confirma que los remolinos de forma elíptica son más estables que los de forma circular.

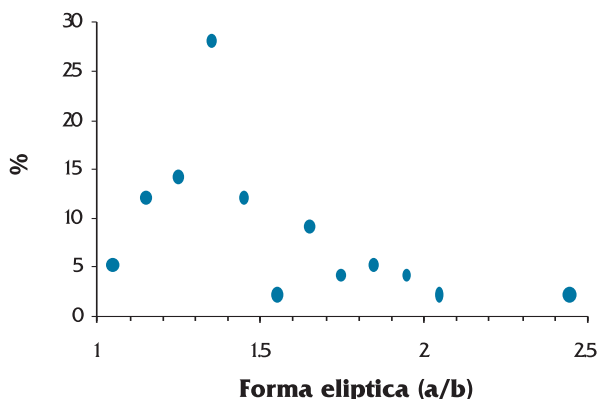


Figura 13. Histograma normalizado de los vórtices detectados en función de su forma elíptica (a/b).

La figura 10 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. Éstas 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).

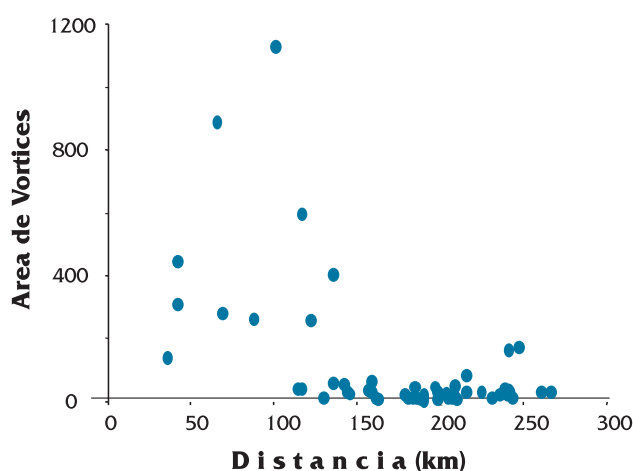


Figura 14. Distancia entre los vórtices y la normal a la línea dominante de la costa desde Cabo Begur.

Los remolinos más extensos (200 - 400 km²) están situados predominantemente hacia el NE a una distancia no mayor de 100 - 125 km. del Cabo Begur (Figura 14). Esta dependencia puede ser debida a la forma característica de la costa (Cabo Begur y Creus) que desestabiliza la corriente Liguero-Provençal y crea una circulación adicional a la corriente predominante costera. También la presencia de profundos cañones submarinos, como el de Lacaze y el de Blanes alejan de la costa a los vórtices baroclinos. (Allen 1988, Ardhuin et al. 1999). Casi todos los remolinos detectados están situados a una distancia de menos de 70 km de la costa.

Se observa que la mayoría de los vórtices se encuentran al sudoeste de los ejes de los cañones submarinos (Figura 10), siguiendo la dirección de la corriente Liguero-Provençal. 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 15.

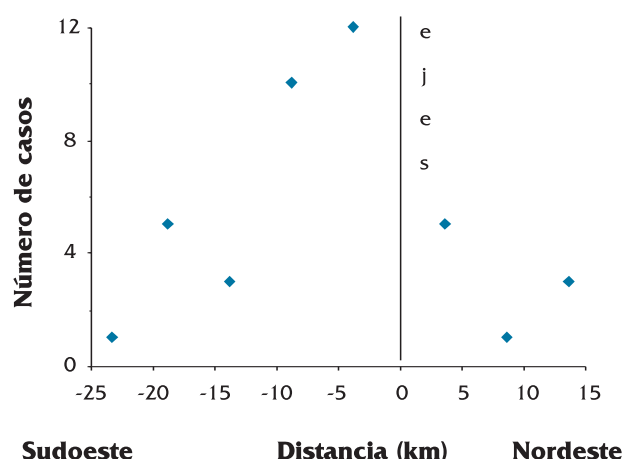


Figura 15. Distribución espacial de los vórtices respecto a los ejes de cañones submarinos cerca de Barcelona, 1997 - 1998.

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 et al. 1996)

CONCLUSIONES

A pesar de que la frecuencia de captura de imágenes SAR es bastante baja debido a cuestiones técnicas (una imagen cada 35 días con el ERS-1/2), las observaciones durante los años 1997 - 1998 han permitido obtener una visión general sobre el estado del medio ambiente marino cerca de Barcelona, investigando tanto la polución litoral como en alta mar. También es posible obtener datos cuantitativos sobre la compleja dinámica superficial de la zona estudiada.

Los resultados del análisis de más de 80 imágenes SAR entre los años 1997 - 1998 así como la comparación con otras medidas y datos obtenidos en la zona nos permiten siguientes conclusiones:

La polución costera se detecta en las imágenes SAR prácticamente en todo período de medidas (1997-1998) tanto como penachos de aguas residuales cerca de Barcelona como cerca de Tarragona y del Delta del Ebro. A veces también aparecen penachos de polución menores desde las desembocaduras de los ríos Tordera y Besos y desde algunas ciudades portuarias e industriales en la costa Brava y Dorada.

En alta mar se observan claramente las rutas marítimas habituales de los petroleros debido a las

manchas de petróleo, aceites y/o sustancias parecidas por sus propiedades físico-químicas que aparecen como vertidos de varias formas en las imágenes SAR.

La compleja dinámica regional de las aguas superficiales también se manifiesta en las imágenes SAR por medio de múltiples estructuras superficiales de origen natural que indican la presencia de vórtices y otras estructuras dinámicas en la superficie del mar. El área con mayor concentración de estructuras dinámicas asociadas a los vórtices y a la cizalladura horizontal del agua, se encuentra en la zona al Este de Barcelona cerca del cañón submarino de Blanes. Otras áreas de relativamente alta frecuencia de detección de estructuras dinámicas están situadas cerca de las Islas Baleares y en el litoral de Tarragona.

La mayoría de los vórtices detectados tienen forma elíptica y ocupan un área menor de 100 km². Se nota una tendencia a la disminución de los tamaños de los remolinos desde el Nordeste hacia el Sudoeste, hecho que puede ser asociado a las inestabilidades generadas por los cañones submarinos.

La distribución espacial de los vórtices respecto a los ejes "thalwegs" de los cañones submarinos, según nuestras observaciones, muestra una considerable dependencia entre los remolinos que se encuentran predominantemente al lado izquierdo de los ejes de cañones, vistos desde alta mar hacia la costa. Este fenómeno se considera como un resultado de los procesos de turbulencia bidimensional debido a la fuerte interacción entre la corriente costera predominante hacia el sudoeste y la influencia de la batimetría de cañones submarinos en la conservación de la vorticidad potencial (Zatsepin et al. 1996).

Realizar un seguimiento de la dinámica marina superficial a mesoescala y el estudio estadísticos de inestabilidades típicas permiten calibrar modelos matemáticos de simulación de corrientes locales, que son una base fundamental para el desarrollo de previsiones, por ejemplo, de velocidad y dirección de deriva de las manchas de petróleo y de contaminación por aguas fluviales

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del proyecto "Clean Seas", contrato ENVA4-CT96-0334, de la Unión Europea. Agradecemos la colaboración de Martin

Gade en la obtención de las imágenes y a G.W. Jolly por la coordinación del proyecto Clean Seas.

REFERENCIAS

- Allen, S.E. (1988). Rossby adjustment over a slope. Ph D thesis, 206 pp. Univ. of Cambridge. England.
- Ardhuim, F., Pinot, J-M., Tintoré, J., (1999). Numerical study of the circulation in a steep canyon of the Catalan Coast (western Mediterranean). *Journal of Geophysical Research*. Vol 104. NO C5, pp. 11.115-11.135, May 15.
- Canals, M., Monaco, A., Dinet, A., Palangues, A., Price, N.B., Ballesteros, E., Redondo, J.M., Nyffeler, F., Keegan, B., Hamelin, B., Frignani, M., Sánchez, J.A., (1997). Transfer of matter and energy on European continental margins. Mediterranean Target Project (MTP) -EUROMARGE-NB Project. Interdisciplinary research in the Mediterranean Sea. Office for Official Publication of the European Communities, Luxembourg., 38, 57.
- Chen, X., Allen, S.E., (1996). The influence of canyon on shelf currents: A theoretical study. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, NO C8, pp. 18.043-18.059, August 15.
- Gade, M. y Redondo J.M. (1999) Marine pollution in European coastal waters monitored by the ERS-2 SAR: a comprehensive statistical analysis. *IGARSS 99*, Hamburg. pp. 308-312.
- Gade, M., Alper, W. (1999) Using ERS-2 SAR images for routine observation of marine pollution in European coastal waters. *The Science of the Total Environment* 237/238 (1999) 441-448.
- Griffiths, R.W. y Hopfinger, E.J., (1986). Experiment with baroclinic vortex pairs in a rotating fluid. *J.Fluid Mech.* 173, 501-518.
- LEVITUS, (1999). Banco de datos oceanográficos. <http://ingrid.ldeo.columbia.edu/>
- Martínez - Benjamin, J.J., (1995). Satellite microwave sensing for oceanographic studies. *Mixing in Geophysical Flows*. J. M. Redondo and O. Metais (Eds.). CIMNE, Barcelona.
- Rojas, P., García, M.A., Sospedra, J., Figa, J., Fàrregas, J.P., López, O., Espino, M., Ortiz, V., Sanchez-Arcilla, A., Manríquez, M., Shirasago, B. (1995). On the structure of the mean flow in the Blanes Canyon area (NW Mediterranean) during summer. *Oceanologica Acta* - Vol. 18, Nº 4.
- Zatsepin, A. G., Kostianoy, A. G. & Semenov, A.V., (1996), Axisymmetrical density current on the sloping bottom in the rotating fluid. *Okeanologia*, 36 (3), pp. 339 - 346 (in Russian).

