

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

#### 1.1.1 Actualidad del problema de la contaminación de aguas marinas

En los últimos años, los países de la Comunidad Europea están prestando más atención a la contaminación, la preservación y al control del medio ambiente terrestre y marino debido al aumento, en las últimas décadas, de la presión antropogénica sobre los ecosistemas marinos y, sobre todo, en las zonas costeras.

Durante siglos el Océano ha podido soportar la contaminación natural y actuación de la sociedad humana sin sufrir grandes modificaciones, pero desde inicio del siglo XX las actividades humanas se han incrementado alcanzando tal nivel que pueden perturbar gravemente los ciclos vitales del ambiente marino/costero y poner en peligro toda su diversidad biológica.

El término “contaminación” de los sistemas acuáticos, en general, abarca efectos nocivos ocasionados por el hombre mediante acciones como son los vertidos de sustancias tóxicas y/o radiactivas, sobrecalentamiento del agua de mar como resultado de su paso por los circuitos de refrigeración de las instalaciones industriales costeras (contaminación térmica), vertidos de agentes patógenos, de desechos sólidos y dispersos, transporte de especies ajenas al hábitat local (contaminación biológica), ruidos provocados por los motores de los vehículos marítimos (contaminación acústica), etc. Actualmente, la contaminación química es el que tiene mayor importancia porque ocurre con mayor frecuencia y provoca mayor impacto ecológico.

En este contexto, cada año se vierten más de medio millón de toneladas de petróleo como resultado de operaciones marítimas, accidentes y descargas ilegales. El carácter de dicha contaminación no es solamente local, sino regional e incluso global. La contaminación perjudica la salud de la sociedad, el turismo, las actividades marítimas como la pesca y la acuicultura, empeora la calidad del agua y sus propiedades útiles pudiendo eliminar totalmente las cadenas tróficas.

Un sesenta por ciento de la población mundial vive en la zona litoral marítima. Es decir, más de 2.700 millones de personas viven a menos de cien kilómetros de la costa marina, y este número podría elevarse a un 75% para el año de 2020. Hay 595.814 kilómetros de litoral mundial donde los recursos costeros son vitales para muchas comunidades locales. La Unión Europea cuenta con aproximadamente 89.000 Km de costas.

El litoral español, con casi 8.000 kilómetros de longitud a lo largo de 25 provincias y 428 municipios, acoge a una tercera parte de la población del país y a cuatro de cada cinco turistas que llegan a España, por lo que está sometido a una serie de presiones ambientales de diverso tipo que amenazan a muchos de los ricos y variados ecosistemas naturales que lo caracterizan. En particular, en la provincia de Barcelona más de 50% de la población vive en una franja costera de unos 15 – 20 Km. En esta franja de agua, tierra y atmósfera se encuentran muchas riquezas naturales y donde además efectuamos diversas actividades económicas como la pesca, comunicación marítima, ocio y otros, en fin, nuestra calidad de vida depende mucho de las condiciones ambientales de ella. Sin duda, el crecimiento de las industrias, del turismo y del transporte marítimo, trae bastantes beneficios a la población catalana pero, por otro lado, crecen los problemas ambientales como, por ejemplo, la marea roja (los “*blooms*” fitoplanctónicos) o la aparición de nuevas fuentes de contaminación industrial/urbana/rural, se observan cambios paisajísticos provocados por la construcción

descontrolada, etc. Por esto es importante la labor de los científicos de todas áreas, debemos definir claramente los problemas ambientales y mostrar sus efectos negativos sobre nuestra calidad de vida y sobre el medio ambiente, tanto a corto como a largo plazo.

### 1.1.2 Fuentes y tipos de contaminación en el Océano

Este tema es bastante amplio y en este trabajo vamos a centrarnos en la contaminación química en general (que está más asociada con las tareas de la presente investigación).

Las fuentes generales más importantes de la contaminación química marina son las siguientes:

- Los vertidos directos de aguas residuales de industrias o desechos urbanos al mar o mediante los ríos.
- Los sedimentos y metales pesados, la basura y el material plástico.
- Las sustancias químicas (fertilizantes, nutrientes, pesticidas, etc.) procedentes de las tierras agrícolas o de los bosques.
- Hundimiento a propósito de los productos contaminantes al ambiente marino, incluyendo los radionucleidos.
- Vertidos accidentales, por averías y a propósito durante las operaciones técnicas de los buques mercantes, petroleros, plataformas petrolíferas y tuberías submarinas del petróleo.
- La exploración de los minerales submarinos.
- Transporte y deposición de contaminantes (aerosoles, productos gaseosos de las emisiones industriales atmosféricas, el escape de transportes automovilísticos, partículas sueltas, etc.) mediante la atmósfera.

Los vertidos de desechos líquidos procedentes de industrias y de saneamiento urbano (penachos de aguas residuales), de accidentes técnicos en los buques petroleros y mercantes, de la limpieza de tanques, de descarga de los residuos y de aguas de lastre, y de accidentes en las plataformas petrolíferas marítimas, provocan una continua aparición de manchas y/o estelas de crudo (*oil spills*) en alta mar, en las aguas costeras e incluso en las playas (las pequeñas bolas de crudo descompuesto). Peor aún, las comunidades bióticas marinas a través de la cadena alimenticia consumen estas sustancias oleosas depositadas en el seno del mar. No es necesario explicar qué tipo de daño para la sociedad provoca constantemente el consumo final de estas especies marinas contaminadas por las sustancias tóxicas y cancerígenas.

Para el océano, el material de origen terrestre representa cerca de un 70% de la contaminación marina, mientras que las sustancias asociadas con las actividades del transporte marítimo y los vertidos en el mar solamente el 10% cada una. (Ministerio de Medio Ambiente, 1999, p.7)

Sin embargo es poco conocido que en realidad la mayor parte del volumen de productos oleosos echados al mar no son los famosos desastres ambientales asociados con los naufragios de petroleros, sino los pequeños derrames de crudo “cotidianos” a causa de la limpieza de tanques, efectuada clandestinamente, por los buques en alta mar, por las actividades portuarias y de refinerías, por el funcionamiento de las plataformas petrolíferas, etcétera.

Hay otros tipos de contaminación marina asociados con las aguas contaminadas procedentes de los ríos y de los emisarios submarinos del saneamiento urbano y con el deslastre de los buques. En algunas ocasiones, el efecto sinérgico de diferentes fuentes de contaminación química junto con la contaminación térmica provoca la eutrofización de aguas costeras o el fenómeno de marea roja asociado con el crecimiento exagerado de algunas especies de algas marinas. Un ejemplo de la

contaminación térmica continua presenta la zona del agua anómalamente tibia situada a lo largo de la costa sur del Mar Báltico. En esta franja costera están concentrados decenas de ciudades grandes de diferentes países, desde Genta hasta Klaypeda. La longitud de esta franja es de 1500 Km y la anchura de 40-60 Km (Fedorov, 2000).

No obstante, las actividades de deslastre de los buques provocan no solamente el impacto químico-físico debido a los derrames de aguas oleosas con todas sus tristes consecuencias, sino el biológico o biogénico. La globalización de los transportes marítimos también conlleva la invasión de especies exóticas, extranjeras o invasoras de invertebrados, algas, bacterias, virus protozoarios que viajen alrededor del mundo en el agua de lastre de los navíos. La introducción de organismos extraños en los ecosistemas que no son propios para ellos puede generar pérdidas de Biodiversidad muy significativas. Los Océanos del mundo han comenzado biológicamente a ser homogeneizados.

El agua de lastre se transporta dentro de los tanques de los buques hasta miles de millas de distancia del lugar donde fue tomada y contiene una diversidad enorme de especies extranjeras, lo que constituye el principal vector para la transferencia marina de las especies a través del mundo. Las naves modernas se diseñan para transportar cargas pesadas o un volumen enorme de materia líquida, al ser descargadas las mercancías y los productos líquidos las naves se transforman en inestables, por eso se toma agua de lastre que proporciona una buena forma de estabilizar el navío; se toma fácilmente a bordo y se descarga; y puede ser cambiada de sitio entre los tanques de lastre dentro de un barco. Además de usar el agua para la maniobrabilidad y estabilidad del barco, se usa para compensar el resultado del consumo del combustible durante el viaje. Más de 100 millones de toneladas son transportadas anualmente. La descarga de agua de lastre trae millones de plantas y animales no nativos en los ecosistemas marinos de los países. La organización Marítima Internacional señala que existen riesgos de enfermar o incluso morir por causa de patógenos marinos introducidos por las aguas de lastre.

### **1.1.3 Algunos aspectos del estado ecológico actual de los mares europeos**

En las últimas décadas ha habido un desarrollo constante de las industrias, del turismo y de la urbanización masiva de las orillas del mar y de los ríos y de lugares antes casi despoblados. Todas estas actividades han aumentado considerablemente el nivel de contaminación del sistema hidrográfico/fluviál y de las costas marinas de toda Europa. Aliviaderos en tiempo de lluvia, riesgo de eutrofia de aguas, disminución de la concentración de oxígeno, vertidos accidentales, mal estado paisajístico de las orillas de los ríos y deltas son habituales. Se ve bien claro que los medios financieros dirigidos para el desarrollo de industrias y de otras actividades lucrativas es mucho mayor que el financiamiento de la preservación de la naturaleza. Precisamente por esto el término “desarrollo sostenible” se encuentra con más frecuencia en los objetivos de proyectos europeos en diferentes marcos científicos.

Según consta (Ministerio de Medio Ambiente, 1999), el estado actual de los mares de Europa, el Mar del Norte está en la peor situación ecológica marina de toda Europa. Este mar sufre una sobreexplotación pesquera, se notan muy altas concentraciones de contaminantes de varios tipos. El Mar Cantábrico está bajo la amenaza de sobrepesca y de la contaminación por metales pesados. En el Mediterráneo existen puntos con elevadas concentraciones de nutrientes, se detecta un alto número de derrames accidentales de crudo y de los penachos de aguas residuales, las actividades pesqueras

disminuyen a causa de la sobrepesca. En el Mar Negro también se observan todas las huellas de sobrepesca, se detecta el crecimiento de concentraciones de nutrientes. El Mar Báltico sufre las consecuencias de intensa sobrepesca, de alto nivel de contaminantes orgánicos y no orgánicos, también posee muy bajo nivel de oxígeno disuelto. Las costas de los mares Báltico y del Norte con más frecuencia se convierten en lugares de la muerte en masa de las focas y los peces. Solamente en el año de 1988 en los cuerpos de las focas muertas en el Mar del Norte se encontraron

cerca de 150 diferentes tipos de contaminantes (Kirilenko, 1994). Según la opinión de los ecólogos marinos, los medios naturales de regeneración de este mar están agotados.

Debido a una considerable y rápida disminución del volumen de aguas fluviales, el Mar Negro está en estado casi catastrófico. El nivel de la zona del sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) disuelto subió hasta la profundidad de 60-70 m y en algunos lugares alcanzó la superficie marina. Cada vez es más difícil encontrar delfines en mar, si en el año de 1966 su población contaba con 500 miles de especies, actualmente su número disminuyó hasta aproximadamente 120 miles. En los últimos diez años en el Río Danubio el contenido de cobre aumentó en diez veces, de magnesio en nueve, de estaño en dos veces, lo que empeoró más la difícil situación ecológica del Mar Negro (Kirilenko, 1994).

En cuanto a los penachos de aguas contaminadas (*pollution plumes*) procedentes de los ríos europeos y de los focos costeros, estos son una amenaza constante para las comunidades marinas y costeras, también para las actividades de pesca, acuicultura, turismo en todo el litoral de Europa. A pesar de que las autoridades y las instituciones locales responsables de la distribución del agua potable, de su control y calidad, de la sanidad y gestión de residuos, hacen esfuerzos para disminuir el riesgo ambiental de vertidos accidentales de substancias peligrosas en los ríos, el bajo nivel de calidad de aguas dulces en toda España es bien conocido. Por ejemplo, cualquier río del área metropolitana de Barcelona carece de actividad piscícola y algunos índices de contaminación de muchos ríos de Cataluña son muy altos (Acebillo et al., 2000). Pero este es un problema no sólo de España, sino también de los demás países europeos. Podemos indicar los países que están situados en las bellas orillas del “pobre” río (mayor de Europa) – Danubio, cuyas aguas fueron varias veces amenazados por graves vertidos industriales.

Sin embargo, los productos petroquímicos vertidos al mar presentan la mayor amenaza para la ecología marina. Según diferentes fuentes, cada año se vierten en los océanos de 1.8 hasta 8.8 millones toneladas de petróleo, de los cuales cerca de 600.000 toneladas son el resultado de operaciones habituales de transporte marítimo, accidentes y descargas ilegales (Ministerio de Medio Ambiente, 1999).

La aparición de los grandes buques petroleros si bien disminuyó el número de viajes necesarios para transportar combustible por vía marítima, incrementó de forma alarmante el impacto social, ambiental y económico de sus accidentes. Esto explica por qué la mitad de los 3 millones de toneladas derramadas entre 1970 y 1990 debido a los accidentes de más de 1.000 petroleros en el mundo, se vertió en los diez accidentes más graves.

Sin embargo los esfuerzos de la comunidad mundial en la lucha contra la contaminación marina tienen sus éxitos y es necesario notar, también, los marcos ecológicos positivos. Según los datos del Ministerio de Medio Ambiente de España, en los últimos años en las aguas europeas disminuyó la cantidad de metales pesados (mercurio, cadmio, plomo, etc.); la cantidad de vertidos al medio marino y el nivel de la eutrofización de las aguas costeras no aumentan desde el inicio de los años 90. (Ministerio de Medio Ambiente, 1999).

#### **1.1.4. Impactos ecológicos de las aguas marinas causados mediante las industrias terrestres y los transportes marítimos**

El océano y la superficie marina ocultan los graves impactos que la industrialización en todos los sentidos hace a las comunidades marinas, al paisaje del fondo, a la calidad y al cambio de la composición físico-química del agua. Esta contaminación llega hasta las grandes profundidades, a donde llevan las corrientes marinas a lo largo de cañones submarinos muchos productos del desecho terrestre; se encuentra una cantidad significativa de todo tipo de basura de origen industrial y urbano: bolsas y piezas plásticas, cristales, restos de neumáticos, etc. Los productos petroquímicos de origen industrial manifiestan un peligro especial. Ellos contaminan a través de la cadena alimenticia desde las comunidades de plancton hasta las especies superiores, entran en menú habitual del hombre provocando graves enfermedades.

En general las consecuencias de la contaminación antropogénica del Océano se puede dividir en dos marcos principales: biológico que está asociado con los cambios de carácter bioquímico, morfológico, fisiológico y genético en los organismos marinos, y ecológico que se revela en el cambio de la biomasa marina, el decrecimiento de la biodiversidad local, la aparición de nuevas especies, la transformación del proceso de producción y de destrucción de la materia orgánica, etc. Concluyendo, la contaminación del medio ambiente marino trae la simplificación de toda la estructura del ecosistema. En el nivel individual, las toxinas cambian la composición química de la célula, los procesos de respiración, disminuyen el nivel del crecimiento y de la reproducción, aumentan el nivel de la mutación y de las formas patógenas y cancerígenas, cambian el tamaño de la célula, destruyen la posibilidad del animal para orientarse en el espacio (Vladímirov et al, 1991).

Los derrames de crudo en alta mar y en las zonas costeras se considera una de las mayores amenazas para la naturaleza. Por ejemplo, las sustancias de “*fuel oil*”, es el tipo de aceite o crudo considerado como uno de más tóxicos para los organismos marinos porque tiene una tendencia natural a dispersarse fácilmente en la columna de agua. Los derrames de crudo de este tipo se descomponen completamente en el ámbito marino por medio de microbios naturales en un período de uno o dos meses aproximadamente. En alta mar sus derrames se dispersan relativamente rápido, este hecho explica la dificultad de observar en estas condiciones medioambientales los peces afectados o muertos. No obstante, en las aguas costeras el efecto mortal de los derrames de “*fuel oil*” se detecta con mucha más frecuencia. En aguas poco profundas las sustancias venenosas procedentes de los derrames afectan con mayor fuerza bancos de peces locales, comunidades bentónicas (mariscos, etc.), algas y plantas marinas. Además, el contacto directo con las sustancias oleosas afecta las aves y los animales marinos, provocando ingestión, ahogamientos e hipotermia durante unas semanas después del desastre.

Toda sustancia peligrosa que se transporta puede sufrir accidentes. En 1967 el buque Torrey Canyon derramó 121.200 toneladas de petróleo en Francia, ocasionando gravísimos daños ecológicos en las costas del Canal de la Mancha. Once años después el petrolero Amoco Cádiz vertió 180.000 toneladas de crudo en este mismo lugar y la “marea negra” cubrió la costa a lo largo de cientos de kilómetros. Las pérdidas ecológicas alcanzaron un valor de 2.2 mil millones de dólares estadounidenses (Limarev, 2000).

Hace tres años nos sobresaltó una vez más el accidente del barco “Erica” que naufragó en diciembre del año 1999 frente de las costas norteñas francesas dejando aproximadamente 18.000 toneladas de crudo en medio marino. La marea negra cubrió 400 Km de la costa francesa y las instituciones autorizadas recogieron más de 200 toneladas de materia biológica marina y costera muerta. La muerte de casi 300.000 aves en las costas bretonas, causaron indignación y fue causa del cambio significativo de la política comunitaria de protección del ambiente marino/costero. Este desastre fue de tal magnitud que despertó una gran atención de todos países comunitarios. Según el Boletín informativo “Tribuna del Parlamento Europeo” (Marzo-Abril 2000, Año XIII, Número 3), los eurodiputados solicitaron una movilización urgente de fondos europeos con el fin de ayudar a los profesionales del mar en aquella región.

La tragedia ecológica de las Islas Galápagos, que son el refugio de cientos de especies endémicas entre ellas tortugas gigantes e iguanas, ocurrida el 19 de enero de 2001 en Ecuador es un ejemplo más de la falta de control de los gobiernos sobre los barcos petroleros. Un derrame de 540.000 litros de combustible en las aguas marinas en las que viven peces tropicales, pelícanos y leones marinos, provocado por el buque-tanque ecuatoriano Jessica, cerca de la Isla San Cristóbal, fue debido a varias negligencias humanas.

La descarga en masa de los residuos y de aguas de lastre provoca nuevos problemas de carácter biológico y ecológico, así como el cambio de la biodiversidad local marina debido al transporte de aguas de lastre.

Las aguas de lastre se componen del agua que incluye sedimentos y millares de especies vivas. Alrededor de 3000 especies marinas viajan diariamente alrededor del mundo. Organismos grandes y pequeños, desde bacterias hasta peces se han documentado en las muestras del agua de lastre de los barcos. Estas especies son exóticas, extranjeras o invasoras, esto significa que un miembro, o miembros de un grupo o de una población de una especie se incorpore en un ecosistema acuático fuera de su hábitat nativo, entonces se prepara el escenario para una posible invasión biológica que podría tener un impacto ecológico y económicamente significativo. Las especies invasoras exóticas son consideradas como la mayor amenaza para la diversidad biológica después de la destrucción del hábitat. Según el *US Geological Survey*, este problema supone unos costos ambientales de unos 100 billones de dólares al año sólo en EE.UU (Sommer, 2002). Los océanos del mundo comenzaron biológicamente a ser homogeneizados hace siglos. En la década pasada se puede decir que hubo un movimiento aparentemente acertado de centenares de especies, hoy día hay dos factores: la velocidad de las naves modernas y el volumen de agua de lastre que están abrumando el éxito de las invasiones acertadas.

Las principales causas del impacto que trae la introducción de especies exóticas suelen ser: a) predominación sobre especies autóctonas que no presentan sistemas de defensa ante tales depredadores, b) competencia con otras especies que ocupan el mismo nicho ecológico y que tienden a ser desplazadas, c) alteración del hábitat y consecuente modificación de la estructura de las comunidades donde se asientan, d) contaminación genética y pérdida de diversidad biológica marina, e) amenaza a salud pública.

### **1.1.5. Factores generales que determinan la gravedad del impacto ambiental de vertidos en el ambiente marino**

Los factores generales que inciden en la magnitud e impacto ambiental de los derrames de productos tóxicos en el mar son siguientes.

El primero es la ubicación geográfica del vertido. La gravedad de impacto de sustancias tóxicas se incrementa cuando se produce en las zonas costeras debido a la gran diversidad biológica existente, a la concentración de zonas pobladas, lugares de turismo y de protección ambiental, y decrece en alta mar donde el número total de especies y de actividades humanas disminuye notablemente. No obstante, existen lugares de mejor o peor posibilidad de acceso inmediato para los grupos de “urgencias marítimas” que instalan las barreras para acercarse al vertido, limpian las costas, etc. En las costas de Alaska, por ejemplo, tal tipo de trabajo cuesta mucho más en todos los sentidos que en los lugares donde hay una infraestructura desarrollada y las condiciones climáticas son más suaves. Otro factor importante es el tiempo biológico del crecimiento de las especies marinas. En las zonas polares que poseen un clima frío, la actividad biológica es bastante lenta y tiene que pasar mucho tiempo hasta que las desagradables consecuencias de un impacto ambiental desaparecen por completo. Lo mismo podemos decir sobre las zonas de arrecifes situadas en los mares cálidos, donde los corales crecen en rango de milímetros en un período de docenas de años.

El segundo, son los factores hidrometeorológicos imperantes en el lugar del accidente. Las mareas altas, las corrientes, el oleaje y los fuertes vientos agravan los efectos ambientales del derrame. Pero influyen, también, los factores ambientales secundarios como son las particularidades locales del proceso de la difusión de la sustancia vertida, la temperatura de la capa superficial del mar, el nivel de la salinidad de aguas marinas, la batimetría del lugar.

Y el tercero es la composición de la sustancia tóxica vertida.

También influye el período del tiempo de impacto, es decir si es un derrame instantáneo y puntual o prolongado mientras el buque averiado estaba en deriva.

Es necesario notar que las consecuencias ecológicas y los factores físicos determinantes en el caso general de un derrame submarino desde un barco que se hundió y está en el fondo del mar o desde un emisario submarino, hasta hoy no están estudiados suficientemente.

#### **1.1.6. Principios de estudios del estado ecológico de aguas marinas**

La investigación del estado de los ecosistemas del Océano es un proceso multidisciplinar que incluye una parte biológica/ecológica y otra parte físico-química, bioquímica y geográfica.

Los principales marcos de estudios son los siguientes:

- Detección de las fuentes de la contaminación, estudio de sus propiedades físico-químicas y dinámicas, la evaluación de su peligro para el ecosistema.
- Estudio de las consecuencias negativas de la contaminación del ecosistema.
- Estudio de las relaciones causa-consecuencia entre los niveles de la acumulación de los productos contaminantes y los cambios ecológicos. Determinación de los valores de las concentraciones críticas de las sustancias contaminantes que provocan las perturbaciones en los procesos químicos y biológicos funcionales.
- Investigaciones complejas de los factores físicos, químicos y biológicos que forman los procesos de regeneración del ambiente marino.
- Desarrollo de los estudios teóricos, de los modelos matemáticos, experimentos de laboratorio y de campo de los procesos asociados con la ecología y la contaminación marina con el fin de estimar

las situaciones críticas en diferentes escalas espaciales/temporales y disminuir las consecuencias de los impactos medioambientales.

Nuestros estudios no pueden abarcar todos estos marcos debido a su complejidad y volumen, por esto nos centraremos solamente en algunos aspectos del problema de la contaminación y ecología marina, en la detección y análisis de las fuentes de contaminantes terrestres y marítimos y en los procesos dinámicos asociados con el ámbito de las aguas europeas y, en particular, con el Mediterráneo Noroccidental.

### **1.1.7. Satélites ambientales y teledetección: una herramienta moderna para detección de fuentes de contaminación de aguas y fenómenos naturales en la superficie marina en mesoescala**

En el medio marino, el volumen de observaciones oceanográficas que se necesitan realizar constantemente para conseguir detectar *in situ* los fenómenos naturales o relacionados con las actividades antropogénicas 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 la gran capacidad de acumular y transmitir informaciones relevantes tanto a meso como a macro escala con periodicidad constante en función de sus órbitas. Los satélites diseñados para las investigaciones del océano pueden detectar concentraciones de clorofila, temperatura superficial, manchas y estelas de petróleo, transporte de sedimentos en las zonas costeras, migración de icebergs, deriva de campos de hielo, batimetría del litoral, corrientes y oleaje, estructuras dinámicas como vórtices y espirales, etc.

La variedad de los sistemas y satélites ambientales operacionales en el espacio es muy grande. Desde 1960, solamente EE.UU. ha lanzado a la órbita espacial más de 50 satélites oceanográficos y meteorológicos, por esto presentamos únicamente algunas herramientas espaciales oceanográficas más útiles para nuestros fines. Unos ejemplos de los sensores ambientales y los satélites son:

- *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) de satélites NOAA-12 y NOAA-14 de EE.UU. (que registra la temperatura de superficie del mar y albedo).
- *Thematic Mapper* (TM) a bordo de SPOT (Francia), LANDSAT-5 (EE.UU.), dispositivo MSU-E de satélite RESURS-01 (Rusia) (tienen sensores en bandas de visible y de infrarrojo).
- *Along Track Scanning Radiometer* (ATSR) a bordo de satélite ERS-1/2 y ENVISAT de la ESA (tiene los sensores que actúan en el espectro de visible, también de infrarrojo cercano y térmico);
- *Coastal Zone Colour Scanner* (CZCS) de satélite Nimbus-7 (EE.UU.), *Modular Opto-electronic Scanner* (MOS) de la construcción alemana instalado en satélite IRS-P3 (India) y *Sea-viewing Wide-Field-of-view Sensor* (SeaWiFS) a bordo de IRS-1C/1D (India), *MEDium Resolution Imaging Spectrometer Instrument* (MERIS) del ENVISAT (todos detectan el color de la superficie marina).
- *Synthetic Aperture Radar* (SAR) a bordo de satélites de la ESA (Agencia Espacial Europea) ERS-1/2 y ENVISAT (ASAR), RADARSAT (Canadá/EE.UU.), OKEAN (Rusia) (un radar activo que registra la rugosidad de la superficie en microescala, es decir en el rango de milímetros-centímetros)

- *Radar Altimeter* (ALT) instalado en los satélites ERS-1/2 y ENVISAT (RA-2), Topex/Poseidón (EE.UU/Francia), Geosat (EE.UU) (el dispositivo ALT permite obtener las características del oleaje y del viento superficial, la topografía de la superficie marina).

Los sensores del satélite ruso ELECTRO (GOMS) pueden medir la velocidad del viento en diferentes alturas y detectar los impactos medioambientales. Los satélites de serie METEOR miden la temperatura de la superficie marina y hacen seguimiento de los campos de hielo suelto en los mares.

Un gran obstáculo en el uso directo y sistemático de las imágenes de satélites en el visible es la nubosidad, a pesar de la aplicación de programas específicos en interpretación de imágenes parcialmente cubiertas. Otro obstáculo es la ausencia de la iluminación solar, es decir que en el tiempo nocturno o con una mala iluminación de la superficie terrestre, los sensores en el visible no funcionan bien. Los sensores activos (radar) a frecuencias donde las nubes son transparentes y la iluminación solar no influye permiten complementar y enriquecer las observaciones habituales 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 a bordo de satélites como SEASAT, RADARSAT, Okean-O, ERS-1/2, ENVISAT las posibilidades científicas y las aplicaciones en oceanografía se han ampliado significativamente (Martínez-Benjamin, 1995), incluso en la detección y seguimiento de los derrames de crudo y de aguas residuales procedentes de los focos de la contaminación marina.

A pesar de que la información de los satélites oceanográficos en la actualidad se han convertido en algo muy habitual, algunos problemas quedan por resolver, y uno de ellos es la verificación de datos adquiridos mediante los satélites a partir de datos medidos *in situ*. Las campañas oceanográficas no han perdido su valor práctico ni en la época de los satélites espaciales.

### **1.1.8. Leyes de España e internaciones de la preservación de medio ambiente marino**

A inicio del siglo XX aparecieron los primeros acuerdos internacionales respecto a la protección del medio ambiente marino, pero sólo en su segunda mitad las leyes y acuerdos internacionales de este tipo se comenzaron a aplicar a las actividades antrópicas cotidianas con seriedad.

Las más recientes normas legislativas del Gobierno Español y Comunitario están dirigidas a aumentar la atención pública a éste frágil aspecto de uso de medio marino. ¿Entonces, a qué nos obliga la legislación actual?

Un acuerdo esencial es el "Convenio de Barcelona" sobre Protección del Mar Mediterráneo de la Contaminación (Barcelona, 16 de febrero de 1976, entrada en vigor en España en 1978), adoptándose en igual fecha un Protocolo sobre cooperación para combatir en situaciones de emergencia la contaminación del Mar Mediterráneo causada por hidrocarburos y otras sustancias perjudiciales.

El Real Decreto 438/1994, de 11 de marzo, publicado en el Boletín Oficial del Estado de fecha 8 de abril de 1994, dictado en desarrollo del Anexo I del Convenio Internacional MARPOL

73/78, establece que todos los buques, cualquiera que sea su clase deben entregar sus residuos oleosos en instalaciones de recepción autorizadas, regulando también cómo han de ser dichas instalaciones.

Por otro lado, la ley 27/1992, de 24 de noviembre, de Puertos del Estado y de la Marina Mercante determina la prohibición de descarga de cualquier clase de residuos en el dominio público portuario y establece un régimen de sanciones para cualquier descarga contaminante desde buques en aguas bajo jurisdicción del Estado Español.

Las instituciones españolas que tienen que apoyar y controlar el funcionamiento práctico de estas medidas jurídicas son: la Dirección General de la Marina Mercante, a través de las Capitanías Marítimas, comprueba en cada puerto que la instalación disponga de los medios de recogida adecuados y que el servicio se preste a los buques con profesionalidad, rapidez y limpieza; las Autoridades Medioambientales de cada Comunidad Autónoma vigilan que los residuos recogidos se transporten con garantías suficientes y que reciban el adecuado tratamiento hasta su reciclado o destrucción; las Autoridades Portuarias de cada puerto donde la instalación MARPOL preste su servicio, establecen un "pliego de condiciones técnicas" que dicha instalación ha de cumplir para poder ejercer su actividad en el dominio público portuario.

Finalmente, la Comisión MARPOL, creada mediante el Real Decreto 438/94 antes mencionado, es el órgano coordinador entre las distintas Administraciones Públicas y dictamina si la instalación cumple con los fines del Programa Sectorial de Instalaciones de Recepción.

En cuanto a la legislación española de protección del ambiente costero: el proceso de deterioro de las costas ha sido favorecido, durante décadas, por el escaso control del desarrollo urbanístico y de la política de infraestructuras, así como por una escasa o inexistente protección frente a procesos de contaminación, extracciones de áridos, depósitos incontrolados de residuos, desecación de humedales y otros factores. Para superar esta situación se aprobó la Ley de Costas, Ley 22/1988 de 23 de julio, que recoge tanto los criterios contenidos en la Recomendación 29/1973, del Consejo de Europa, sobre protección de zonas costeras, como la Carta del Litoral de 1981, de la Comunidad Económica Europea y en otros planes y programas de la misma. Dicha Ley ha sido desarrollada mediante el reglamento aprobado por Real Decreto 1471/1989, de 1 de diciembre.

En cuanto a las actividades de deslastre y a la invasión de las especies exóticas: la Organización Marítima Internacional y la Ley Federal de Control y Protección contra la Alteración por Elementos Acuáticos No Autóctonos recomienda para reducir la tasa de nuevas invasiones el intercambio del agua de lastre en mar abierto. Los organismos arrastrados en el proceso tienen poca probabilidad de supervivencia en las aguas costeras cuando son descargadas al llegar a puerto. Este intercambio no es cien por cien efectivo; los sedimentos podrían no ser descargados o los tanques podrían no ser descargados en su totalidad, permitiendo que las especies dañinas permanezcan en los tanques. Otras metodologías de tratamiento para el agua de lastre son la filtración, tratamiento con calor, tratamiento con biocidas e irradiación con luz ultravioleta.

La catástrofe del Exxon Valdez, ocurrido en 1989, modificó en forma sustancial la normativa internacional de transporte de sustancias peligrosas por vía marítima. En 1993 la Organización Marítima Internacional (OMI), organismo de las Naciones Unidas, estableció que los petroleros que se fabricaran a partir de esa fecha debían contar con doble casco. Los que tenían 25 años de antigüedad tendrían que adoptar mayores medidas de seguridad para prorrogar su vida útil y dejar de utilizarse a los 30 años. Sin embargo, el flanco débil de la normativa estribó en su alcance porque sólo

rige para los buques que transportan más de 20.000 toneladas de crudo, o más de 30.000 toneladas de productos refinados del petróleo.

El Parlamento Europeo últimamente está muy encima de los medios que permiten realmente disminuir los riesgos de la contaminación del mar. Según el Boletín del PE N 3, la Eurocámara propone una directiva inmediata para que todos los barcos que hagan escalas en los puertos comunitarios contribuyan, al menos en un 90%, a los costes de las instalaciones portuarias de recogida de residuos. El pago deberá ser obligatorio, así habrá menos motivos para desprenderse de los residuos en alta mar.

Otra de las medidas que adoptó la Comunidad Europea es la publicación cada 6 meses de una lista negra con los buques que tendrán negado el acceso a puerto. Estableció también que para el año 2015 estarán prohibidos todos aquellos que no dispongan de doble casco. La medida surgió después de conocerse las conclusiones del informe anual del *Memorandum París* (MOU). Después de inspeccionar el 25 % de los petroleros que arriban a sus costas, el estudio indicó que 675 de los 1.576 buques analizados en 1998 presentaban deficiencias de distinta clase. En 87 buques fueron tan graves que los petroleros fueron retenidos. La Comisión Europea difundió también que la antigüedad media de los petroleros registrados en la Unión Europea es superior a los 19 años y que casi la mitad de los buques están en los listados antes de 1979. Reveló asimismo que sólo el 21 % de los tanques destinados al transporte de crudo tienen doble casco (Guerra, R.A., 2001).

Después del famoso naufragio del barco de bandera maltesa Erika ocurrido en diciembre de 1999 en Francia y el triste récord de haber sufrido otros 5 derrames de crudo por petroleros en la década de 1990, la Comunidad Europea también endureció las normas de seguridad de los petroleros con la adopción del Libro Blanco. Está basado en el principio de responsabilidad ambiental que obliga a los responsables de la contaminación a pagar los costos de limpieza y recuperación de las zonas afectadas para “remediar” el daño causado. El principio de responsabilidad ambiental sustentado en la frase “el que contamina paga” sólo es efectivo cuando el responsable de la contaminación es identificado, el daño resulta cuantificable y se puede establecer una conexión. Después de realizar una evaluación económica del daño, se podrá determinar si el área contaminada es recuperable o no. Si la restauración es técnicamente imposible, las compensaciones podrán destinarse a otros proyectos alternativos de recuperación ambiental.

## 1.2. MOTIVACIÓN

Es evidente que la información sobre el estado de la contaminación de aguas marinas y costeras y los procesos dinámicos que determinan la migración y la dispersión de contaminantes sueltos, es muy importante en los marcos de protección civil, industrialización y urbanización de las costas, construcciones marítimas y actividades portuarias, navegación, pesca, turismo y en fin para la salud y bienestar de nuestra sociedad.

Imaginemos un hipotético accidente marítimo frente a las costas Catalanas de un petrolero tipo Erika (del año 1999) y el derrame de petróleo de muchas toneladas es difundido y arrastrado por corrientes marinas, oleaje y viento hacia... no se sabe a donde exactamente. Inmediatamente surgen muchas preguntas sobre el peligro que trae tal tipo de desastre. Algunas de ellas suelen ser las siguientes: ¿qué volumen y que área tiene aquella mancha de crudo?, ¿aumentará su tamaño?, ¿qué tiempo va a existir en el medio marino antes de desaparecer?, ¿a donde realmente irá derivando?, y si es hacia la costa, ¿qué lugar exactamente será afectado y... cuando? Después vienen otras pregunta y

no de menor importancia: ¿cómo es el nivel tóxico de dicha sustancia suelta?, ¿qué tipo de peligro a corto y largo plazo puede traer tal siniestro para las comunidades marinas/costeras y para la sociedad local? De las correctas respuestas a todas estas preguntas dependen en primer lugar las acciones urgentes de las autoridades para neutralizar las consecuencias negativas de dicho derrame en alta mar y en la costa, en segundo – todos los costes materiales y medios adecuados para realizar estos trabajos.

Podemos señalar que en el caso real del Erika las primeras predicciones científicas de la trayectoria de la deriva de la mancha dieron un resultado tranquilizador, es decir que el derrame tenía que derivar hacia el mar abierto. Pero al cabo de un par de días toda la masa de crudo estuvo ya en las costas Bretonas. ¿Quiere esto decir que la predicción fue errónea? Creo que no, solamente es un caso más que nos enseña con claridad cómo influyó el bajo nivel del conocimiento oceanográfico/meteorológico del área donde ocurrió este triste accidente, sobre los resultados de los eficaces modelos de predicción. Es realmente evidente que toda la matemática y los sistemas computacionales no pueden sustituir las monitorizaciones periódicas *in situ* y/o mediante los dispositivos aéreos / espaciales de tal complejo sistema natural como es el ambiente marino. En este caso la investigación del comportamiento de los derrames y de la dinámica de la zona, especialmente del régimen de las estructuras turbulentas marinas como son remolinos, vórtices en todas escalas espaciales y temporales, es imprescindible.

La estadística y la visualización gráfica de un modo sistemático de los derrames de aguas residuales procedentes de los ríos locales y de otros focos costeros asociados con las actividades de zonas urbanas e de industrias, turismo, etc., casi no existen para el área del Mar Balear. Tampoco existen para esta región los resultados de análisis estadístico de los derrames de crudo (*oil spills*) en alta mar y de estudios periódicos de su comportamiento, lo que es muy importante para el desarrollo de sistemas automáticos de su detección y seguimiento.

Los problemas del aumento constante del volumen total de tráfico marítimo de sustancias químicas peligrosas, incluyendo las radioactivas, en aguas europeas y del crecimiento del número de barcos petroleros operativos de “tercera edad” son más asociados con los accidentes en alta mar y con dinámica marina y con dispersión de contaminantes en una mesoescala de centenas de kilómetros. No obstante, las nuevas construcciones marítimas, las reformas y transformaciones de los puertos traen otros problemas asociados con el cambio del régimen dinámico local en la escala menor pero de mucha importancia también. Por ejemplo es evidente que las recientes construcciones en el Puerto de Barcelona (una bocana nueva y la ampliación del área del puerto que abarcará el delta del Río Llobregat) provocarán algunos cambios significativos de la dinámica de aguas locales, quiere esto decir que necesitan nuevos estudios oceanográficos para saber cómo será el comportamiento de una mancha hipotética en el área acuática del puerto y del penacho de aguas residuales procedentes del Río Llobregat en aguas someras cerca de Barcelona.

Hay otro aspecto de los estudios de la dinámica de las aguas a mesoescala que tiene poco que ver con la contaminación marina pero tiene mucha importancia vital, es decir, el problema de búsqueda y seguimiento de un barco o un yate averiado o de un tripulante caído al agua accidentalmente en alta mar. Para las autoridades de Salvamento Marítimo los conocimientos del régimen dinámico del área de accidente y una rápida predicción de la localización geográfica del punto a donde pudiera ser derivado el objeto bajo la acción de las corrientes, oleaje y viento, puede ser imprescindible a la hora de tomar una decisión y salvar una vida humana.

Resumiendo todo lo anteriormente mencionado, podemos concluir que, a pesar de toda su importancia para la sociedad moderna, actualmente el conocimiento real del nivel de la contaminación de aguas costeras catalanas no es suficientemente alto. Tampoco se conocen bien las particularidades de la dinámica y de la difusión de contaminantes en alta mar. Sin embargo hay unos trabajos interesantes sobre los marcos generales de dinámica marina del área del Mar Balear y del Golfo de León, también existen los estudios ecológicos puntuales en algunos lugares de la costa catalana, pero los resultados de estos estudios no muestran aún un cuadro suficientemente detallado en diferentes escalas temporales y espaciales de los procesos dinámicos de la región. Además, pocas investigaciones tienen una periodicidad y escala espacial adecuada para esclarecer el grado real de la contaminación marina y costera del Mediterráneo Noroccidental MN, compararlo cuantitativamente con los resultados obtenidos en otras zonas de la Unión Europea.

Considerando los constantes esfuerzos legislativos de la UE dirigidos a la protección del ambiente marino, la importancia de los problemas ecológicos para toda la sociedad y el implícito insuficiente nivel de conocimientos en el área de estadística y dinámica de contaminantes en el Mediterráneo Noroccidental, este trabajo pretende dar un paso más en esta complicada tarea, en la dirección a profundizar en los estudios medioambientales multidisciplinarios.

### 1.3. OBJETIVOS

**Seleccionar y sistematizar la información** gráfica de satélites (imágenes) y la adicional asociada con la contaminación y dinámica superficiales del MN para el período de 1996-1998.

**Analizar el estado actual de la contaminación del MN** en alta mar y en las zonas costeras, compararlo con otros mares de la Unión Europea utilizando los resultados del proyecto *Clean Seas* y los datos adicionales.

**Evaluar la incidencia discriminativa de los derrames** accidentales de hidrocarburos de diferentes niveles de riesgo ambiental vertidos en aguas europeas en los últimos treinta años, aplicando los resultados nuevos obtenidos en el ámbito del proyecto *Clean Seas*.

**Aplicar los resultados prácticos** obtenidos mediante los estudios de imágenes y los experimentos de laboratorio al desarrollo de la base teórica de procesos multiescalares asociados con la dinámica de aguas.

**Proponer nuevas herramientas** y metodologías para el futuro sistema automático de la detección de los derrames accidentales, los barcos causantes y las fuentes costeras (análisis topológico y tipificación de estructuras oceanográficas superficiales, almacenamiento y visualización de la información sobre el medio ambiente marino/costero y la contaminación a base de un Sistema de Información Georeferenciada SIG).

### 1.4. DEFINICIONES

1. Este trabajo presenta diversas aplicaciones teóricas y prácticas de las imágenes de los satélites ERS 1/2 y RADARSAT del sensor tipo Radar de Apertura Sintética SAR (más de 300 imágenes), así como de otros tipos de imágenes de satélites a los estudios de contaminación marina y de dinámica de las aguas en el Mediterráneo Noroccidental.
2. Fuente principal de datos lo constituye una colección de las imágenes espaciales obtenidas de forma periódica durante los años 1996-1998 generalmente en el ámbito del proyecto Europeo

*Clean Seas*. También se utilizan las imágenes de los proyectos *Oil Watch* y *ERS-1/2 SAR Exploitation Study in Catalonia*.

3. El área geográfica de interés comprende el área marítima del Mediterráneo Noroccidental: Islas Baleares - Delta del Ebro - Cabo de Creus - Golfo de León - Marsella - Islas Baleares.

### 1.5. DESARROLLO Y RESULTADOS OBTENIDOS

1. Selección temática de las imágenes de satélites generalmente obtenidas a partir de los proyectos *Clean Seas*, *OILWATCH* y *ERS-1/2 SAR Exploitation Study in Catalonia* (más de 300 imágenes en el período de 1996-1998) y de la información alfanumérica y gráfica adicional (histórica, cartográfica, hidrometeorológica, geofísica) de la zona del MN y de las aguas europeas.
2. Colección sistematizada y georeferenciada de los fragmentos de imágenes de los derrames de crudo y de los penachos detectados y de los datos adicionales (su posición geográfica, forma y tamaño).
3. Mapas temáticos de la situación geográfica y de las características de los derrames y los penachos detectados.
4. Análisis estadístico de las características topológicas de los derrames y de los penachos. Normalización de los resultados.
5. Análisis estadísticos temporal y espacial de la ocurrencia de los derrames en alta mar y de los penachos en el litoral.
6. Resultados cuantitativos de la tipificación de los derrames detectados.
7. Análisis estadístico de la ocurrencia de los derrames de crudo de varios tamaños en aguas de la Unión Europea en base a los resultados del presente trabajo y de los datos estadísticos de los últimos 30 años, aplicación de la ley de Zipf.
8. Mapa del área aproximada de los derrames accidentales ocurridos en el período 1996-1998 en el Mediterráneo Noroccidental.
9. Análisis comparativo de los resultados del proyecto *Clean Seas* a partir de diferentes zonas de estudios (Mediterráneo Noroccidental, Mar del Norte, Mar Báltico).
10. Resultados de los estudios adicionales de la dinámica multiescalar de la zona del MN:
  - análisis topológico y espacial de los vórtices detectados en el MN mediante los sensores de satélites. Elaboración de los mapas temáticos, aplicación de los datos del experimento de laboratorio.
  - análisis cuantitativo de las particularidades de marea en diferentes puntos del MN, esquema de la propagación de la onda de marea.
11. Ejemplos de la aplicación del análisis multifractal para distinguir estructuras de diferentes orígenes detectadas en la superficie del mar.

Regresar al Índice

Seguir