

## 4.2. DERRAMES DE CRUDO EN AGUAS COSTERAS DE EUROPA

### 4.2.1. Estadística de los derrames detectados en el ámbito del proyecto *Clean Seas*

Según (Ministerio de Medio Ambiente, 1999), el litoral europeo está diariamente amenazado por mareas negras. Todos los días se registran vertidos de hidrocarburos menores de 10 toneladas, tres o cuatro veces al año vertidos de 10 a 700 toneladas, y cada un año y medio vertidos superiores a las 700 toneladas.

Para evaluar cuantitativamente la contribución de los derrames pequeños “habituales” a la masa total del volumen de aguas contaminadas, que vierten los petroleros en los mares europeos, se han utilizado los resultados del proyecto *Clean Seas CS* efectuándose una evaluación estadística. El objetivo principal de este complejo estudio fue evaluar el papel sinérgico de diferentes satélites medioambientales en la detección de la contaminación marina en tres áreas del espacio marino pertenecientes a la UE: Mar del Norte, Mar Báltico y Mediterráneo Noroccidental. También se desarrollaron los métodos de procesamiento y análisis de datos así como el uso de modelos hidrodinámicos aplicados a las condiciones locales.

La situación de las áreas de estudio pueden verse en las figuras 3.1, 4.1.1 (Mediterráneo Noroccidental), 4.2.1 (Mar Báltico) y 4.2.2 (Mar del Norte). Las áreas de observación fueron escogidas entre las regiones de mayor riesgo de contaminación marina debido al intenso tráfico marítimo y las actividades económicas asociadas. También se consideraron las posibilidades de seguimiento de los focos del florecimiento crítico de algas (*algae bloom*).

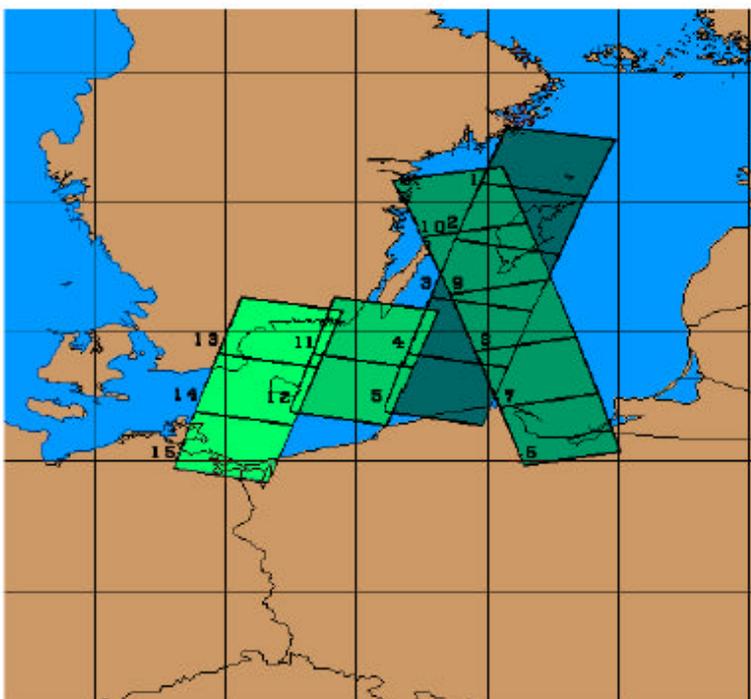


Figura 4.2.1. Área de la monitorización espacial de los derrames de petróleo en el mar Báltico (proyecto CS)

El área de observación en el Mar Báltico cuenta con una superficie de 100.828 Km<sup>2</sup> aproximadamente. Esta zona tiene el peligro de contaminación a través de sustancias asociadas con la industria agrícola (fertilizantes, pesticidas) y, como consecuencia del alto nivel de nitrógeno disuelto en las aguas, el fuerte crecimiento de cianobacterias (*blue-green algae*). También existe contaminación debido al

intenso tráfico marítimo (actividades de mantenimiento y limpieza de tanques, accidentes y naufragios). Otra causa, más natural, pero que llama la atención y suele ser monitoreada mediante satélites, es una intensa deriva de sedimentos y aguas residuales desde las costas de Alemania, Polonia, Rusia y Repúblicas Bálticas por los grandes ríos en la temporada de fuertes lluvias.

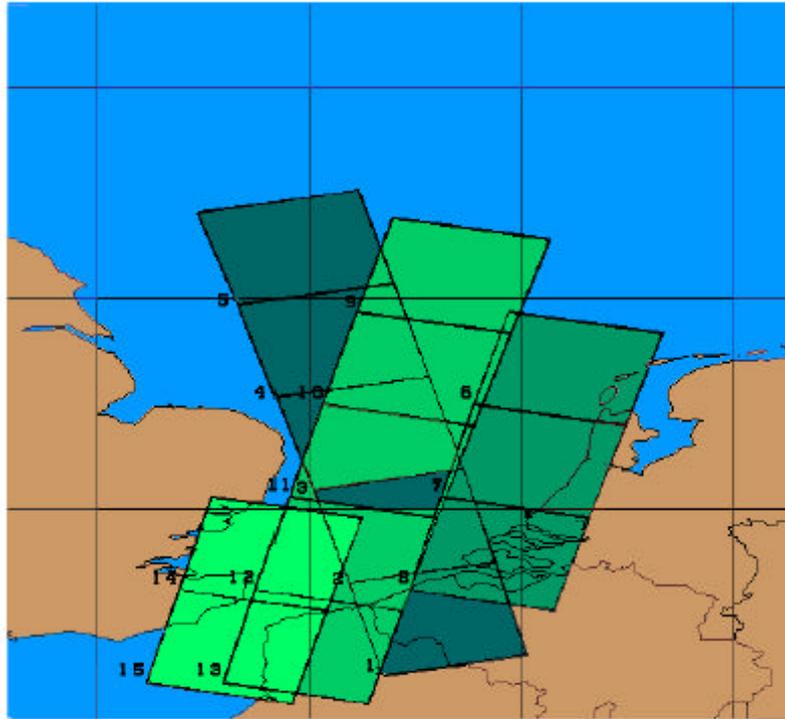


Figura 4.2.2. Área de la monitorización espacial de los derrames de petróleo en el Mar del Norte (proyecto CS)

La región de ensayo del Mar del Norte junto con el Canal de La Mancha fue seleccionada como área (81.441 Km<sup>2</sup>) muy importante de pesca comercial y tráfico marítimo. Se producen también descargas de sedimentos, de metales pesados y de aguas residuales mediante el río Rhin. El Canal presenta una ruta marítima con el tráfico de buques muy intenso, lo que significa que hay una seria posibilidad de accidentes marítimos y un gran riesgo de contaminación puntual. Los datos obtenidos a partir de la combinación de diferentes tipos de imágenes de satélites y de modelos matemáticos locales de dinámica marina ayudaron a profundizar en los conocimientos de las características hidrológicas y la dinámica de las aguas costeras (variación temporal/estructural del penacho del río Rhin) de dicha región.

El Mar Balear con el Golfo de León (una parte de Mediterráneo Noroccidental con una área de 106.782 Km<sup>2</sup>) fue seleccionado por tres razones principales:

- 1) Es un lugar donde se forman las aguas profundas Mediterráneas mediante los procesos dinámicos en la capa superficial durante las temporadas de invierno y otoño.
- 2) Se observa una significativa manifestación de las industrias y de las actividades agrícolas en las costas que provoca una descarga de aguas dulces contaminadas por las sustancias químicas y biológicas, metales pesados, etc. Las zonas de riesgo principales son las ciudades grandes como Barcelona y Marseille, los deltas de ríos Ebro y Rhone, plataforma petrolífera de Casa Blanca (frente a Tarragona).

- 3) Es una región con mucho tráfico de buques donde existen las rutas marítimas habituales hacia las direcciones principales de Estrecho de Gibraltar - Francia y de Barcelona - Islas de Mallorca.

La realización del proyecto *Clean Seas* permitió evaluar cuantitativamente el rango de la contaminación (temporal y espacial) en estas tres áreas marinas observadas durante los años del 1996 al 1998. Según los resultados obtenidos en el área del Mediterráneo Noroccidental esta se puede constatar como la más contaminada pero se debe tener en cuenta que las condiciones meteorológicas locales (la baja celeridad del viento superficial principalmente) fueron bastante más oportunas para la detección de vertidos mediante las imágenes SAR. No obstante, el litoral de Barcelona, debido a las aguas residuales descargadas mediante los ríos Besos y Llobregat, se puede considerar como la mayor fuente de contaminación del litoral de Cataluña: el penacho de aguas contaminadas aparece casi en todas las imágenes SAR obtenidas.

Las figuras 4.2.3, 4.2.4 y 4.2.5 muestran las ubicaciones y las áreas de los derrames detectados mediante imágenes SAR en las zonas de estudio en el Mar Báltico, Mar del Norte y Mediterráneo Noroccidental entre los años 1996 y 1998.

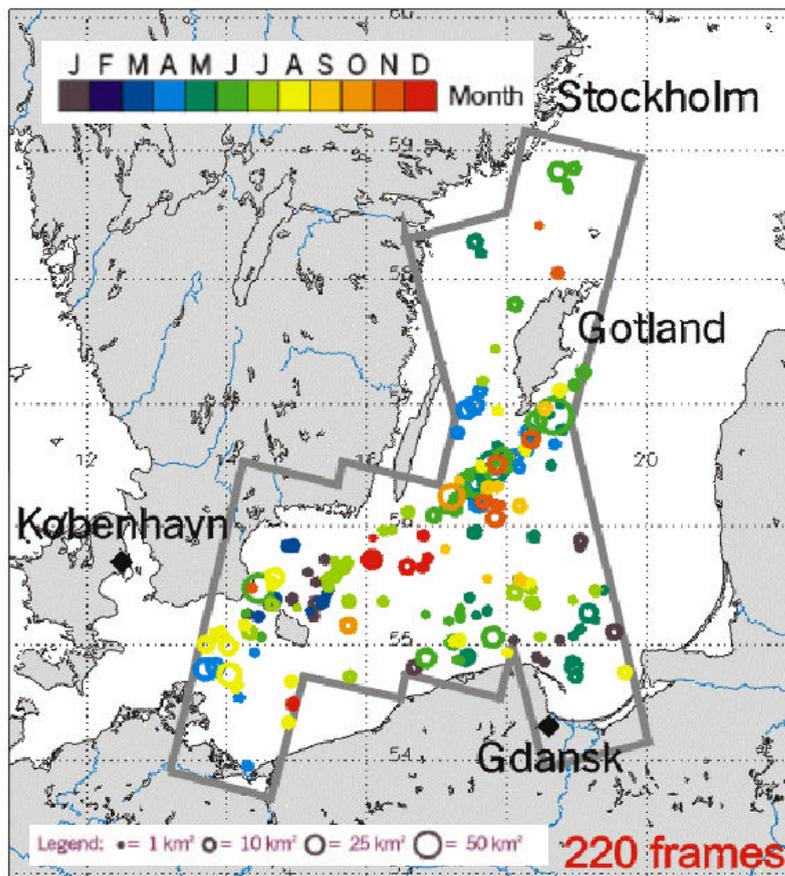


Figura 4.2.3. Derrames detectados mediante imágenes SAR en el área de estudio en el Mar Báltico (proyecto *Clean Seas*). Los colores de escala señalan los meses de la detección de los derrames de color correspondiente. Los tamaños de los círculos muestran el área que ocupan los derrames. Fuente: Jolly et al., 2000.

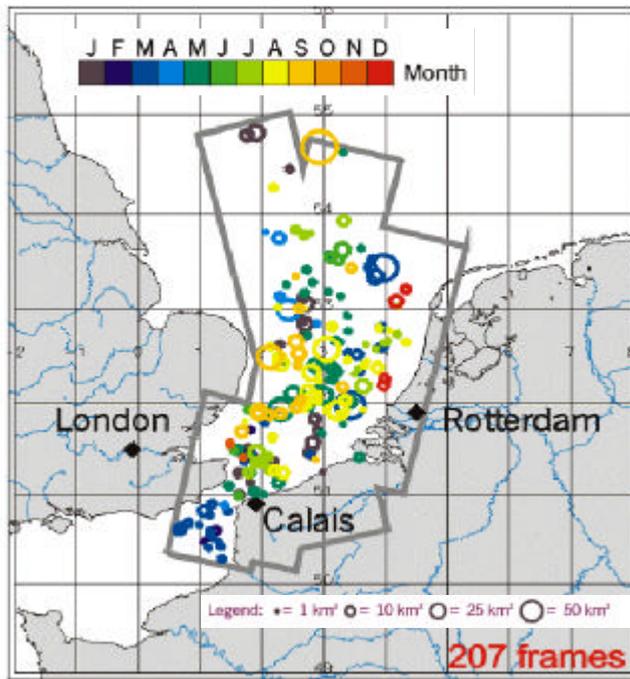


Figura 4.2.4. Derrames detectados mediante imágenes SAR en el área de estudio en el Mar del Norte (proyecto *Clean Seas*). Los colores de escala señalan los meses de la detección de los derrames de color correspondiente. Los tamaños de los círculos muestran el área que ocupan los derrames. Fuente: Jolly et al., 2000.

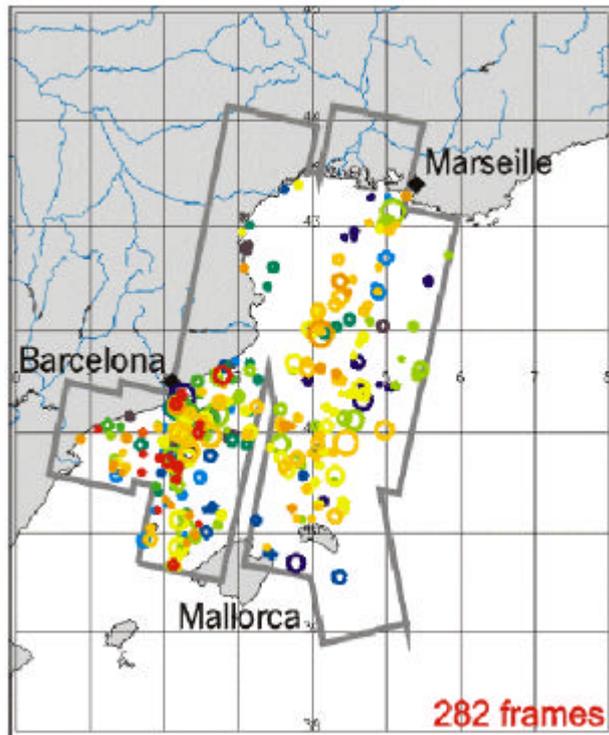


Figura 4.2.5. Derrames detectados mediante imágenes SAR en el área de estudio en el Mediterráneo Noroccidental (proyecto *Clean Seas*). Los colores de escala señalan los meses de la detección de los derrames de color correspondiente. Los tamaños de los círculos muestran el área que ocupan los derrames. Fuente: Jolly et al, 2000.

En la tabla 4.2.1. se muestran los resultados del análisis estadístico de las áreas de los derrames de crudo detectados en las tres zonas de estudio bajo el proyecto *Clean Seas*, también mediante los proyectos *Clean Seas*, *OILWATCH* y *ERS-1/2 SAR Exploitation Study in Catalonia* pero solamente en la zona del Mediterráneo Noroccidental (la segunda columna de la tabla). La diferencia en los números de los derrames detectados en la misma zona de estudio mediante diferentes proyectos (las columnas 2 y 3 de

la tabla 4.2.1) radica en el hecho de que no sólo se utilizaron los datos de diferentes orígenes (del RADARSAT y del ERS-1/2), sino que las imágenes tuvieron distintos niveles de resolución espacial.

Tabla 4.2.1. Número de derrames de distintas áreas detectados mediante diferentes proyectos y zonas de estudio en los años de 1996 a 1998.

1	2	3	4	5	6
Límite del área $S, \text{ km}^2$	MN Diferentes proyectos	MN Proyecto CS	Mar del Norte Proyecto CS	Mar Báltico Proyecto CS	Suma Proyecto CS
$0.1 < S < 1$	71	101	70	73	244
$1 \leq S < 5$	141	142	90	77	309
$5 \leq S < 10$	45	39	19	20	78
$10 \leq S < 25$	25	15	8	8	31
$25 \leq S < 50$	9	5	6	1	12
$50 \leq S < 100$	2	0	1	0	1
Total:	293	302	194	179	675

Nota: a) En la segunda columna de la tabla 4.2.1 se encuentran los números totales de los derrames detectados bajo los proyectos *Clean Seas*, OILWATCH y ERS-1/2 SAR *Exploitation Study in Catalonia*. b) MN - Mediterráneo Noroccidental.

Los participantes del proyecto CS de la Universidad de Hamburgo tenían a su disposición todas las imágenes del SAR de la resolución 50m/píxel, hecho que les permitió detectar el mayor número de las manchas pequeñas del área de 0,1 a 1,0  $\text{Km}^2$  en la zona del MN (101 casos frente a 71 casos detectado por nosotros). Nuestro grupo, de la UPC, tenía solamente una parte de imágenes con esta relativa alta resolución y nuestro análisis se basa en las imágenes del SAR de la resolución 200m/píxel en general. También influyó el factor subjetivo a la hora de escoger las manchas. Para comparar entre si los datos obtenidos en diferentes zonas de estudio mediante el proyecto *Clean Seas* (Mediterráneo Noroccidental, Mar del Norte y Mar Báltico) y utilizarlos para las conclusiones estadísticas, utilizaremos generalmente los resultados de las columnas 3-5 de la tabla 4.2.1 (proyecto *Clean Seas*). La razón es que todos estos datos se obtuvieron del mismo modo, basado en las imágenes de la misma resolución, lo que hace que los datos adquiridos sean más homogéneos desde el punto de vista estadístico.

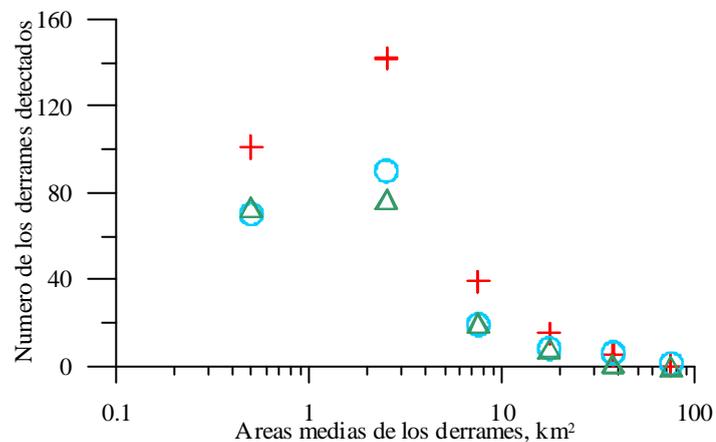


Figura 4.2.6. Número de los derrames detectados en diferentes áreas según la tabla 4.2.1 en las zonas de estudio del Mediterráneo Noroccidental (cruces rojas), Mar del Norte (círculos azules) y Mar Báltico (triángulos verdes).

El mayor número de los derrames se detectó en el área del Mediterráneo Noroccidental (302 casos), lo que indicaría que esta zona marítima es la más contaminada (Figura 4.2.6). Sin embargo, hay que considerar las condiciones hidrometeorológicas favorables a la detección satelitaria presentes en esta zona (el viento y el oleaje son más suaves todo el año en general) respecto a las condiciones en las zonas

del Mar del Norte y en el Mar Báltico. En estos mares norteños los frecuentes y fuertes vientos en época de invierno (con velocidad mayor de 10 m/s) agitan mucho la superficie marina, hecho que dificulta la detección de las películas de crudo mediante el dispositivo SAR (ver el capítulo 2.3.3). Según (Gade y Alpers, 1999), las condiciones hidrometeorológicas especialmente en el período de mal tiempo en el Mar del Norte y en el Mar Báltico (desde septiembre hasta abril) pueden explicar el menor número de detección de derrames mediante el SAR en estas áreas con respecto al área del MN. Las figuras 4.2.3 y 4.2.4 claramente muestran que la mayoría de derrames se detectaron en el Mar del Norte y en el Mar Báltico durante los meses de verano.

En las zonas del Mar del Norte y del Mar Báltico se detectaron 194 y 179 casos de derrames respectivamente. La mayoría de las manchas detectadas en todas las áreas tienen de uno a dos kilómetros cuadrados de superficie. Dos manchas mayores (de 50 y 75 Km<sup>2</sup> aproximadamente) fueron detectadas en el área del Mediterráneo Noroccidental. La mayor se visualizó englobando dos imágenes del SAR superpuestas, y que se muestra en la figura 4.1.7.

#### 4.2.2. Estadística de accidentes históricos en aguas costeras de Europa durante los años 1966 - 1999

Presentamos un análisis comparativo estadístico de los datos históricos de grandes siniestros de petroleros durante 34 años (entre 1966 y 1999) en aguas de Europa en paralelo al análisis de derrames habituales, relativamente pequeños basado en los datos de (*Environmental Technology Centre*, 2001; *CUTTER ENVIRONMENT*, 1997) y los resultados estadísticos de la detección de derrames pequeños (de hasta 75 Km<sup>2</sup>) obtenidas en tres áreas (Mar del Norte, Mar Báltico y Mediterráneo Noroccidental) mediante el proyecto *Clean Seas* (Jolly et al., 2000, Gade y Alpers, 1999).

En la Tabla 4.2.2 se muestran los grandes accidentes marítimos ocurridos en un período de 34 años en toda área de aguas costeras de Europa asociados con derrames de productos petroquímicos. El mayor siniestro del período referido aconteció en el año de 1978 cuando el petrolero Amoco Cádiz derramó unas 233.565 Tm, de crudo en el medio marino cerca de las costas bretonas (Francia). Se han clasificado los accidentes según la masa del crudo derramado (ver tabla 4.2.3) con el fin de hacer un análisis comparativo con los derrames observados en las imágenes obtenidas en el ámbito del proyecto *Clean Seas*.

Tabla 4.2.2. Grandes accidentes asociados a vertidos de hidrocarburos ocurridos entre 1966 y 1999 en aguas costeras de Europa. Fuentes: *Environmental Technology Centre*, 2001; *CUTTER ENVIRONMENT*, 1997). Nota: los números en negrita significan los valores aproximados.

NN	Nombre de barco	Año de accidente	Lugar de accidente, coordenadas	Masa (Tm), grado de accidente
1	Anne M. Brioving	1966	Mar del Norte, Helgoland Islands, 53°13' N, 7°30'E	16.000, D
2	Fina Norvege	1966	Italia, Sardinian Islands, 40°08'N, 09°05'E	6.500, E
3	Mosil	1966	Estrecho de Gibraltar 36°00'N, 06°00'W	5.000, E
4	Torre Canyon	1967	Mar Céltico, Lizard Point 50°03'N, 04°44'W	129.857, B
5	Spyras Lemos	1968	Océano Atlántico, Vigo (España), 42°18'N, 08°42'W	20.000, D
6	Polycommander	1970	Océano Atlántico, Vigo (España), 42°14'N, 08°43'W	10.000, E
7	Othello	1970	Norte de Cattedgat (Mar Báltico)	<b>35.000</b> , D
8	Pacific Glory	1970	Canal de la Mancha, Isla de Wight, 50°35'N, 01°20'W	3.541, E
9	Marlena	1970	Sicily, Cabo Passera 36°15'N, 15°10'E	14.000, E

10	TexacoDenmark	1971	Mar del Norte, Bélgica.	107.143, B
11	Trader	1972	Mediterráneo, costa del Este, 30°00'N, 28°00'E	37.500, D
12	Theodors V	1974	Sicilia (Mar Tirreno)	<b>22.500</b> , D
13	J. Colocotronis	1974	Cabo de Rass Dimass (Estrecho de Sicilia)	<b>5.000</b> , E
14	Peter Maersk	1974	Canal de la Mancha (Picardía, Francia)	<b>5.000</b> , E
15	St. Mary	1974	Cabo de Roca (Lisboa, Portugal)	<b>5.000</b> , E
16	Universe Leader	1974	Cabo de Mizen Head (Sur de Irlanda)	<b>5.000</b> , E
17	Jakob Maersk	1975	Cabo de Carvoeiro (Portugal) 41°11'N, 08°44'W	82.503, C
18	Olympic Aliance	1975	Canal de la Mancha, Estrecho de Dover, 50°59'N, 01°35'E	10.429, E
19	P.Colocotronis	1975	Waddeneilanden (Mar del Norte, Holanda)	<b>5.000</b> , E
20	Ellen Gonway	1976	Este del Mar de Alborán	<b>35.000</b> , D
21	Urquiola	1976	Bahía de Coruña, 43°23'N, 08°22'W	95.714, C
22	Al Dammam	1976	Mediterráneo, Grecia, 38°00'N, 22°00'E	15.714, D
23	Bohlen	1976	Norte del Golfo de Vizcaya, Brittany, 48°11'N, 05°12'W	7.146, E
24	URSS 1	1977	Estrecho de Bósforo, 41°10'N, 29°10'E	20.857, D
25	Agip Venezia	1977	Cabo Bon (Canal de Sicilia), 35°35'N, 16°11'E	5.000, E
26	Al Rawdatain	1977	Bahía de Génova (Mar de Liguria), 44°24'N, 08°48'E	8.500, E
27	Matria B	1977	Malta (Sudeste de Mediterráneo)	<b>5.000</b> , E
28	Amoco Cádiz	1978	Oeste de Bretaña (Francia), 48°35'N, 04°43'W	233.565, A
29	Andros Patria	1978	Punta de Estaca, Mar Cantábrico, 43°13'N, 09°37'W	49.660, D
30	Chrissi	1978	Cerca de Atenas (Mar Egeo)	<b>5.000</b> , E
31	Christos Bitas	1978	Cerca de Dublín (Mar de Irlanda), 51°43'N, 05°40'W	5.000, E
32	Eleni V	1978	North Sunderland (Mar del Norte), 52°49'N, 01°48'E	4.790, E
33	Kosmas M.	1978	Estrecho de Dardanelles, 40°05'N, 27°00'E	10.473, E
34	Gino	1979	Cerca de La Roshelle (Golfo de Vizcaya, Francia)	<b>35.000</b> , D
35	Independentza	1979	Entrada a Bósforo (Mar Negro), 41°00'N, 29°00'E	98.255, C
36	A. Gramsci	1979	Mar Báltico, cerca de Ventspils, 57°24'N, 21°32'E	4.942, E
37	Betelgeuse	1979	Slea Head (Sudoeste de Irlanda), 51°41'N, 09°30'W	28.014, D
38	Hitra	1979	Oeste de Jutlandia (Mar del Norte)	<b>5.000</b> , E
39	Massinaki Frontis	1979	Norte de Creta (Mediterráneo)	<b>5.000</b> , E
40	Ver Berlinguieri	1979	Golfo de Follonica (Norte del Mar Tirreno)	<b>5.000</b> , E
41	J. A. Lavalleja	1980	Al-Hoceima (Mar de Alborán)	<b>35.000</b> , C
42	Gogo Rambler	1980	Este del Mar de Alborán	5.000, E
43	Irene's Serenade	1980	Islas Jónicas (Mar Jónico), 36°56'N, 21°40'E	124.490, B
44	Tanio	1980	Golfo de Cardigan (Gran Bretaña), 49°01'N, 03°00'W	17.313, D
45	Cavo Cambanos	1981	Mediterráneo Noroccidental, 41°11'N, 07°09'E	21.283, D
46	Giobe Assimi	1981	Mar Báltico, 55°43'N, 21°07'E	14.748, E
47	Bellona	1983	Cerca de Goteborg (Mar Báltico), 57°39'N, 11°56'E	24.684, D
48	Sivand	1983	Cabo Kinnaird Head (Mar del Norte) 53°36'N, 00°11'W	6.857, E
49	Patmos	1985	Sicilia (Mar Jónico)	<b>5.000</b> , E
50	Lyudvik Svóboda	1985	Mar del Báltico, Ventspils, 57°24'N, 21°32'E	5.235, E
51	Petragen One	1985	Bahía de Gibraltar, 36°08'N, 05°27'W	5.109, E
52	Orleans	1986	Norfolk (Mar del Norte)	<b>5.000</b> , E
53	Fuyoh Maru	1987	Canal de la Mancha, Río Seine, Le Havre, 49°30'N, 00°30'E	11.554, E
54	Storage tank	1988	Mar del Barentz, Kandalaksha, 67°09'N, 32°21'E	4.211, E
55	Amazzone	1988	La entrada oeste al Canal de la Mancha	<b>5.000</b> , E
56	Sea Spirit	1990	Islas Canarias, Océano Atlántico, 35°53'N, 05°57'W	9.864, E
57	Haven	1991	Mediterráneo, Puerto de Génova, 44°23'N, 09°52'E	144.000, B
58	Aegean Sea	1992	Cerca de La Coruña (Océano Atlántico) 43°20'N, 08°20'W	74.490, C
59	Braer	1993	Escocia (Gran Bretaña), 59°00'N, 01°30'W	85.034, C
60	British Trent	1993	Mar del Norte, Ostende, 51°14'N, 02°55'E	5.102, E
61	Sea Empress	1996	Bahía de Mill, UK, 51°44'N, 05°02'W	72.361, C
62	Bona Fulmar	1997	Mar del Norte, Estrecho de Dover, 51°05'N, 02°37'E	6.803, E
63	Erika	1999	Golfo de Vizcaya, al frente de la costa de Bretaña	18.000, D
64	Volganef 248	1999	Bahía de Kucukcekmece, Bósforo (Mar de Mármara)	0.800, E
			TOTAL:	1.874.800

Tabla 4.2.3. Estadística de los mayores accidentes en aguas costeras de Europa en los años de 1966 a 1999.

Masa del derrame M, Tm	Números de casos	Grado condicional de accidente
M>200.000	1	A
100.000<M<200.000	4	B
50.000<M<100.000	6	C
15.000<M<50.000	16	D
M<15.000	37	E
Total:	64	



Figura 4.2.7. Mayores accidentes de petroleros en aguas costeras de Europa en los años 1966-1999 (Tabla 4.2.2). Los colores rojo, gris, azul, verde y amarillo corresponden al grado de accidente A, B, C, D, E según la tabla 4.2.3 y los números corresponden al caso de accidente según la tabla 4.2.2.

### 4.2.3. Papel de los pequeños y grandes derrames en la contaminación del mar

Para estudiar el papel de los derrames pequeños y habituales en la contaminación marina global, fue necesario normalizar los datos adquiridos bajo el proyecto *Clean Seas* de pequeños derrames (tablas 4.2.1) en el tiempo y el espacio y hacer algunas aproximaciones. El área de aguas de Europa incluyendo el Mar Negro, Mar Mediterráneo, Mar del Norte, Mar Báltico con los estrechos y una parte del Océano Atlántico (las aguas de la franja de 200 millas marítimas que bañan las costas del Reino Unido, Noruega y Rusia) tiene 6.062.400 Km<sup>2</sup> aproximadamente. Todos los grandes accidentes de la tabla 4.2.2 tenían lugar en esta misma área en un período de 34 años. De otro lado, el área total de las tres zonas de estudio del proyecto *Clean Seas* (CS) cuenta con unos 289.051 Km<sup>2</sup>.

En el caso de derrames pequeños, tenemos que elaborar unos coeficientes de proporción e introducirlos en la siguiente ecuación de normalización:

$$Nn = Ni \frac{At}{Acs} \frac{Nft}{Nfr} \frac{1}{Na} \frac{35}{n} \quad (4.2.1)$$

donde  $Nn$  es el número normalizado de derrames del área de todos mares Europeos,

- $Ni$  es el número total de derrames detectados en tres zonas de estudio del proyecto CS,
- $At$  es el área total de aguas marinas de Europa y  $Acs$  es el área total de monitorización bajo el proyecto CS. Entonces, la relación entre estas dos áreas nos da un factor de área 20.97,
- $Nft$  es el número total ( $1000 = (50_{frames \text{ de tres zonas}}) \cdot 700/35$ ) de imágenes que podían ser adquiridas teóricamente durante el período del proyecto CS (700 días),
- $Nfr$  es el número total (709) (Jolly et al., 2000, p.60) de imágenes realmente obtenidas mediante el proyecto CS,

entonces la relación entre  $Nft$  y  $Nfr$  nos da un factor que compensa la falta de imágenes para análisis.

- $Na$  es el número de los años del estudio bajo el proyecto CS (1,9178) y relación  $\frac{1}{Na} = 0,512$  es un factor de tiempo que nos permite obtener el número promedio de las observaciones realizadas en un solo año.

-  $n$  es el número de días de la persistencia de la mancha hasta que esta desaparece, es decir la relación entre 35 días ( $N_{35}$  es la periodicidad de las observaciones mediante satélites ERS-1/2) y el valor de  $n$  nos da un número aproximado de cuantos derrames podían ser detectados en este período de persistencia de los vertidos en la superficie marina, si las observaciones se efectuasen a una periodicidad no de 35 días, sino a una frecuencia mayor, ya que este es un dato variable que a su vez depende de los factores ambientales, así como, también del propio tamaño del derrame, que se ha considerado de forma detallada.

Los resultados de cálculos mediante la ecuación 4.2.1 sobre la base de los datos de la tabla 4.2.3 se muestran en la tabla 4.2.4.

En la columna 6 de la tabla 4.2.4 se presenta el número normalizado de derrames que podían ser detectados teóricamente en la toda el área de aguas de Europa en un período de 1 año con la periodicidad de monitorización por satélite de 35 días. En las columnas 7-10 de la tabla 4.2.4 se presenta el mismo número de probabilidad pero en la condición de diversos períodos de la persistencia de las manchas en la superficie marina en días  $n$ , calculado como  $k=35/n$ .

Para el caso de grandes derrames (tabla 4.2.3) calculamos los valores de la masa de crudo en función al área, considerando las siguientes condiciones mencionadas en Vladimirov et al., 1993 (pag.273). Un espesor medio de la capa de la mancha de  $0,305m^{-6}$ ,  $0,352m^3$  de crudo ocupa un área de  $1 Km^2$ . Si consideramos una aproximación que la densidad media de productos petroquímicos derramados en mar es

$\rho = 0.76 \text{ Tm/m}^3$ , se obtiene que 0,2675 Tm ocupa una área de 1 Km<sup>2</sup> o que un área de 3,738 Km<sup>2</sup> corresponde a 1 Tm de crudo.

Tabla 4.2.4. Número normalizado de los pequeños derrames basado en los resultados del proyecto *Clean Seas*.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Límites de área, Km <sup>2</sup>	Area media Km <sup>2</sup>	Ni total de casos	Ni * (At/Acs =20.97)	(4) x (Nft/Nfr = 1.41)	N/año (5) x 0,512 =N <sub>35</sub>	N/año Persist. n de 2 días (k=17.5)	N/año Persist. n de 3 días (k=11.7)	N/año Persist. n de 5 días (k=7)	N/año Persist. n de 7 días (k=5)
0.1 - 1.0	0.5	244	5117	7215	3694	64645	43220	25858	18470
1.0 - 5.0	3	309	6480	9137	4678	81865	54733	32746	23390
5.0 - 10.0	7.5	78	1636	2307	1181	20668	13818	8267	5905
10.0 - 25.0	17	31	650	916	469	8208	5487	3283	2345
25.0 - 50.0	37.5	12	252	355	182	3185	2129	1274	910
50.0 - 100.0	75	1	21	30	15	262	176	105	75

También se considera el factor de tiempo del período de observaciones (34 años) de la tabla 4.2.2, es decir aplicar el coeficiente  $0,02941 = 1/34$  para obtener una estimación de la probabilidad anual de ocurrencia de derrames grandes (Tabla 4.2.3). La tabla 4.2.5 muestra los resultados de estos cálculos. En esta tabla como valor máximo de la masa (columna 1) se utilizó el dato del derrame del buque Amoco Cádiz de la tabla 4.2.2.

Tabla 4.2.5. Probabilidad anual de ocurrencia de derrames de gran tamaño según los datos de la tabla 4.2.3.

1	2	3	4	5	6
Límites de masa, Tm	Límites de área, km <sup>2</sup>	Area media, km <sup>2</sup>	N total de casos	Factor de tiempo 1/34	N casos/año (4) x (5)
< 15000.0	20000.0-56075.0	38038	37	0.02941	1.09
15000.0-50000.0	56075.0-186916.0	121495	16	0.02941	0.47
50000.0-100000.0	186916.0-373832.0	280374	6	0.02941	0.176
100000.0-200000.0	373832.0-747663.0	560748	4	0.02941	0.118
200000.0-233000.0	747663.0-871028.0	809345	1	0.02941	0.029

Tabla 4.2.6. Número anual normalizado de la ocurrencia de pequeños derrames de distintas áreas con persistencia de 2 - 5 y 7 días en aguas de toda Europa . Número anual de grandes derrames.

1	2	3	4	5	6	7
Área media de una mancha, Km <sup>2</sup>	N casos / año Persist. 35 d (k=1)	N casos / año Persist. 2d (k=17.5)	N casos / año Persist. 3d (k=11.7)	N casos / año Persist. 4d (k=8.75)	N casos / año Persist. 5d (k=7)	N casos / año Persist. 7d (k=5)
0.5	3694	64645	43220	32322	25858	18470
3	4678	81865	54733	40932	32746	23390
7.5	1181	20668	13818	10334	8267	5905
17	469	8208	5487	4104	3283	2345
37.5	182	3185	2129	1593	1274	910
75.0	15	262	176	131	105	75
Grandes derrames						
Área, Km <sup>2</sup>	N casos/año					
38038.0	1.09					
121495.0	0.47					
280374.0	0.176					
560748.0	0.118					
809345.0	0.029					

En la tabla 4.2.6 se presentan los resultados del cálculo de la probabilidad de la ocurrencia de pequeños y grandes derrames relacionados con su extensión durante un año con una persistencia de las manchas pequeñas de 2-5 y 7 días. Los resultados de las columnas 3-7 se obtienen como el producto del número de casos de derrames que ocurren en un año (columna 2) por el coeficiente  $k=35/n$ , donde 35 es el período de observación en días y  $n$  es el número de días de persistencia de la mancha en la superficie anteriormente mencionado.

El análisis comparativo estadístico de datos históricos de grandes naufragios de petroleros en 34 años en aguas costeras de Europa y de cantidad normalizada de derrames habituales relativamente pequeños basado en una estimación según los resultados de las detecciones del proyecto *Clean Seas*, muestra una relación potencial en escala logarítmica entre cantidad de casos de derrames y su tamaño. La presente relación con una buena aproximación cumple la ley de Zipf, (ley de incremento de entropía; Zipf, 1949), y se describe como  $r f = C$ , donde  $r$  es el rango de evento,  $f$  es la frecuencia de su ocurrencia y  $C$  es una constante. Según Laherrere (1996),

$$P_i \approx C i^{-a} \quad (4.2.2)$$

Donde  $P_i$  es la frecuencia de ocurrencia de un evento (número de casos de la detección de los derrames en un rango de área),  $C$  es la constante,  $i$  es el rango o complejidad (tamaño) de evento (en nuestro caso, es el área media de los vertidos) y  $a$  es la potencia, cuyo valor es igual a uno si el proceso es independiente de la escala. Transformando la ecuación (4.2.2) a escala logarítmica, obtenemos:

$$\log P_i = \log C - a \log(i) \quad (4.2.3)$$

o

$$y = b - ax \quad (4.2.4)$$

donde  $y$  es  $\log P_i$ ,  $\log C$  es la constante  $b$  y  $a$  es la potencia o pendiente (coeficiente de proporción) según se ve en la figura 4.2.8 construida en la escala logarítmica a base de la tabla 4.2.6.

Tabla 4.2.7. Coeficientes  $a$ ,  $b$  de la ecuación 4.2.4 y coeficiente de determinación  $R$ -cuadrado para las manchas pequeñas de distintos tiempos de persistencia en ajuste con las manchas grandes (figura 4.2.8).

Persistencia, días	$b$	$a$	$R$
2	11.498091	-1.063542	0.984161
3	11.028912	-1.026797	0.983014
4	10.689268	-1.000223	0.981899
5	10.429090	-0.979849	0.980958
7	10.036444	-0.949111	0.979251

La figura 4.2.8 presenta el número anual de pequeños derrames (de área de hasta 75 Km<sup>2</sup>) de distintos tiempos de persistencia en la superficie del mar y el número anual de grandes derrames (de área mayor de 35.000 Km<sup>2</sup>) frente a sus áreas. En la figura 4.2.8 se ha tenido en cuenta tanto las distintas áreas de muestreo (detección) de los derrames grandes y pequeños como los distintos tiempos de detección, con lo cual se incluye una normalización espacio-temporal de los conjuntos de datos a distinta escala. El tiempo de persistencia de las manchas de crudo, está relacionado con factores medioambientales más

variables, tales como oleaje, viento y estructura de la corriente dominante y por tanto se mantiene su dependencia en la figura.

Según la tabla 4.2.7, el coeficiente  $a$  varía entre  $-1,06$  (el número de derrames de la persistencia de 2 días) y  $-0,95$  (número de derrames de la persistencia de 7 días). La línea de aproximación de números de derrames correspondientes a la persistencia de 4 días de la gráfica 4.2.8 se ajusta mejor con la distribución de Zipf (el coeficiente  $a$  igual a  $1,002$ ). En el apartado 4.2.4 discutiremos este factor más ampliamente.

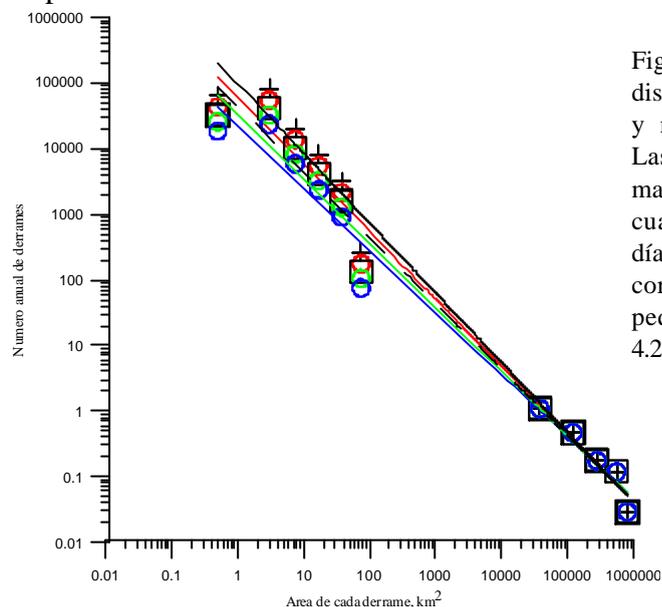


Figura 4.2.8. Número anual de pequeños derrames de distintos tiempos de persistencia en la superficie del mar y número anual de grandes derrames frente a sus áreas. Las cruces de color negro significan número de las manchas de la persistencia de 2 días, círculos – de 3 días, cuadrados negros – de 4 días, círculos verdes – de 5 días, círculos azules – de 7 días. Las líneas de color correspondiente son las líneas de ajuste de las áreas de pequeños y grandes derrames según los datos de la tabla 4.2.7.

Tabla 4.2.8. Área y masa totales anuales estimadas de pequeños y grandes derrames.

NN	Área de un derrame, Km <sup>2</sup>	N casos/año	Área total, Km <sup>2</sup>	Masa total, Tm
1	0.5	32322	16161	4323
2	3.0	40932	122796	32848
3	7.5	10334	77505	20732
4	17.0	4104	69768	18661
5	37.5	1593	59737	15975
6	75.0	131	9825	2633
7	38038.0	1.09	41461	11091
8	121495.0	0.47	57103	15275
9	280374.0	0.176	49346	13200
10	560748.0	0.118	66168	17700
11	809345.0	0.029	23471	6278

Nota a) Los derrames de tamaños de hasta 75 Km<sup>2</sup> se han calculado con una persistencia estimada de cuatro días; b) La masa total anual se calculó basándose en la siguiente aproximación: un derrame de 0.2675Tm ocupa un área de 1 Km<sup>2</sup>.

Tabla 4.2.9. Estimación del área y masa total anual de los pequeños y grandes derrames

Límite del área, Km <sup>2</sup>	Área total, Km <sup>2</sup>	Masa total, Tm	%
0,5 – 80	242.000	69.000	62
35.000 – 800.000	151.000	40.000	38
total	393.000	109.000	100

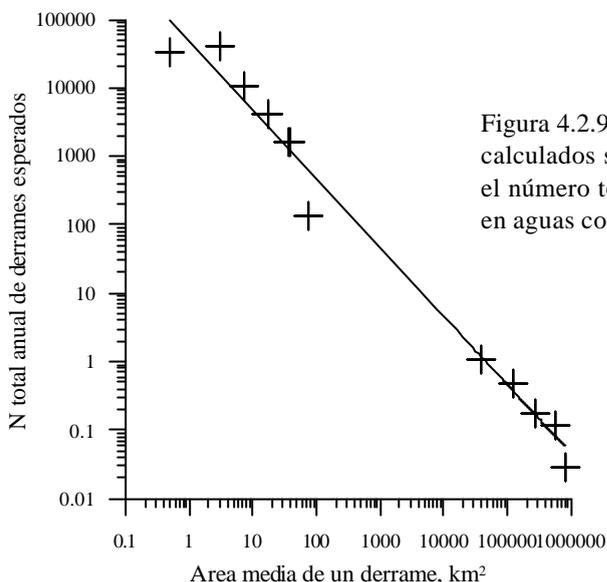


Figura 4.2.9. Número total normalizado de pequeños derrames calculados según una persistencia media de 4 días junto con el número total de derrames grandes en el período de un año en aguas costeras de Europa.

La tabla 4.2.9 muestra una estimación del área y masa total anual de los pequeños y grandes derrames en aguas costeras europeas.

La figura 4.2.10 muestra el porcentaje de los derrames pequeños y grandes en las aguas costeras de Europa según la tabla 4.2.9. La masa o el área total evaluadas de las manchas pequeñas es mayor de la de los derrames causados mediante grandes accidentes marítimos.

La figura 4.2.11 presenta una estimación del área total de derrames de distintos tamaños en el período de 34 años comprendido entre 1966 y 1999 en aguas costeras europeas.

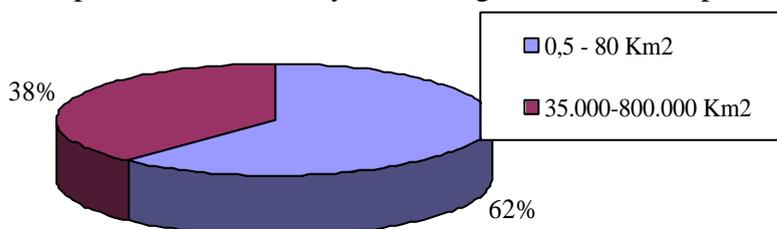


Figura 4.2.10. Porcentaje del área o masa total anual estimada de derrames pequeños (del área de 0,1 Km<sup>2</sup> a 100 Km<sup>2</sup>) y grandes (de tamaño de 13.000 Km<sup>2</sup> a 936.000 Km<sup>2</sup>) en las aguas costeras de Europa.

La ley de Zipf (Zipf, 1949) indica que la frecuencia de la ocurrencia de algunos eventos asociados con las actividades antropogénicas es mucho mayor a escala pequeña que a escala grande y la función de esta dependencia tiene una forma hiperbólica (en la escala logarítmica – lineal). Esta ley es bastante universal y tiene lugar en lingüística (la frecuencia de la ocurrencia de las palabras con menor número de letras es mayor que la de las palabras largas en cualquier texto), en estadística social (la cantidad de las ciudades frente a su población), en la minería, etc. Además se usa en nuevas tecnologías, como, por

ejemplo, en INTERNET en los buscadores automáticos de los textos temáticos mediante las palabras claves.

En nuestro caso la comparación entre la ley de Zipf y los resultados obtenidos nos permiten las siguientes conclusiones:

1. El período medio de la persistencia de derrames pequeños de 4 días parece más probable en las condiciones reales porque su línea de aproximación corresponde mejor a la distribución estadística de Zipf, es decir el coeficiente de ajuste  $a$  fue más cerca a uno ( $a=1.002$ ).
2. Estadísticamente la suma de las áreas normalizadas de derrames pequeños (de área de 0,5 hasta 80 Km<sup>2</sup>) es mayor que la suma de las áreas de derrames grandes (de 35.000 Km<sup>2</sup> hasta 800.000 Km<sup>2</sup>) (ver tabla 4.2.9 y figuras 4.2.9 y 4.2.10), que quiere decir que los pequeños y habituales accidentes no tienen menor importancia que los grandes y el daño que ellos hacen al ambiente marino, sin mucha publicidad, es muy considerable.

La tabla 4.2.9 muestra que en aguas costeras de Europa la masa anual estimada de las manchas pequeñas es mayor que la de derrames de crudo provocados por grandes naufragios de petroleros tipo Erika (18.000 Tm) ocurrido en el 1999.

Tabla 4.2.10. Estimación del número anual de derrames de distintos tamaños en función de su persistencia en la superficie marina en las aguas costeras de Europa.

Area media de un derrame, Km <sup>2</sup>	N casos por un año	Tiempo	Tiempo	Tiempo	Tiempo	Tiempo	Tiempo	Tiempo	Tiempo
		1 día k=35	2 días k=17.5	3 días k=11.7	4 días k=8,75	5 días k=7	7 días k=5	10 días k=3.5	15 días k=2.33
0.5	3694	129290	64645	43220	32322	25858	18470	12929	8618
3.0	4678	163730	81865	54733	40932	32746	23390	16373	10913
7.5	1181	41335	20668	13818	10334	8267	5905	4134	2755
17.0	469	16415	8208	5487	4104	3283	2345	1642	1094
37.5	182	6370	3185	2129	1593	1274	910	637	425
75.0	15	525	262	176	131	105	75	52	35

La figura 4.2.11 muestra el número de derrames pequeños de tamaño inferior a 75 Km<sup>2</sup> superpuestos distintos tiempos de persistencia en la superficie marina en escala logarítmica según los datos de la tabla 4.2.10. Para los mayores vertidos de crudo detectados, posiblemente el período de casi dos años de observación sea insuficiente, por otra parte también se aprecia una posible falta de resolución para la detección de los derrames de menor tamaño. Se ve claro que el menor número de días de persistencia de un derrame nos da el mayor número de derrames de cada tamaño y como resultado – la mayor área anual total. Las líneas de aproximación del número de derrames de distintas persistencias son paralelas y la pendiente de todas es igual a 1,04726. La explicación de esta aparente discrepancia radica en el hecho de que faltan datos de los casos de derrames de un rango mayor para que se revelase una distribución estadística del tipo de Zipf con mejor o peor ajuste de las pendientes.

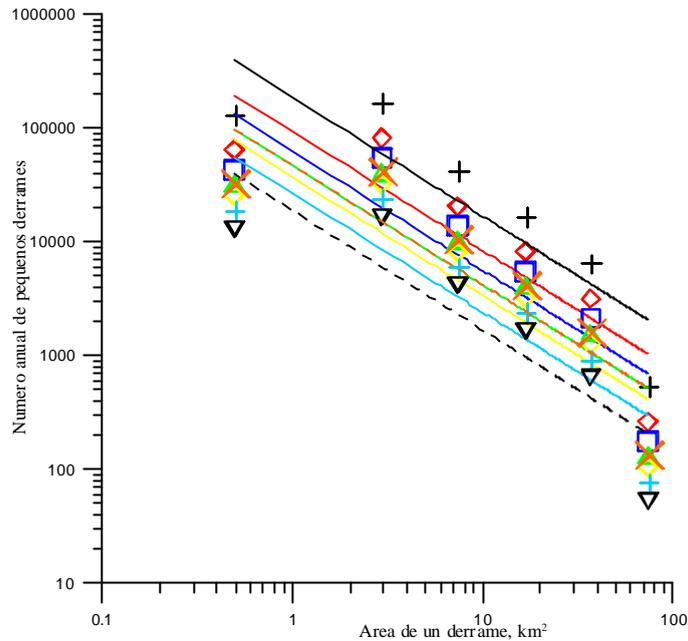


Figura 4.2.11 Número anual de pequeños derrames en aguas costeras de Europa. Las cruces y la línea de color negro significan la probabilidad de las manchas con persistencia de un día, cuadrículas y la línea rojas - de dos días, cuadrículas y la línea azules - de tres días, una equis y la línea punteada naranja - de cuatro días, triángulos y la línea verdes de cinco días, círculos y la línea amarillas - de siete días, cruces y la línea azul - de diez días, triángulos y la línea punteada negras - de quince días.

**4.2.4. Tiempo de persistencia de pequeños derrames en la superficie marina en función de su tamaño inicial**

Vamos a tener en cuenta en este apartado una dependencia de la persistencia de los derrames de crudo con su tamaño. Es lógico que un derrame grande tarde más en dispersarse hasta que su concentración sea inferior a la mínima necesaria para su detección mediante una imagen del SAR. Por otra parte también la dispersión horizontal efectiva en la superficie del mar depende de la escala según la aplicación de la Ley de Richardson. En el año de 1926 Richardson por primera vez propuso la hipótesis (para la turbulencia de atmósfera) que el coeficiente efectivo de la difusión turbulenta  $Kr$  aumenta junto con la escala del proceso físico. A base de sus experimentos empíricos él concluyó que  $Kr$  tiene que ser proporcional a  $r^{4/3}$ , donde  $r$  es la escala del fenómeno. En Ozmidov, (1990) en el caso general esta dependencia se describe como  $K = c_1 \epsilon^{1/3} \ell^{4/3}$ , donde  $c_1$  es constante y  $\epsilon$  es la velocidad de transporte de energía a lo largo de escalas espectrales por unidad de masa.

Según la tabla I.II de (Ozmidov, 1990), tenemos una ecuación clásica para el caso de la difusión bidimensional de contaminante procedente de una fuente puntual. La variación del logaritmo de la relación entre la concentración  $\bar{c}(r,t)$  del contaminante a lo largo del vector-radio  $r$  [m] y la concentración  $\bar{c}(0,t)$  en el centro de la mancha se puede expresar como,

$$\ln \left[ \frac{\bar{c}(r,t)}{\bar{c}(0,t)} \right] = -\frac{r^2}{4K_L t} \tag{4.2.5}$$

donde  $K_L$  [ $m^2/s$ ] es el coeficiente de difusión horizontal y  $t$  es el tiempo de difusión en segundos.

La ecuación (4.2.5) se transforma en

$$\bar{c}(r, t) = \bar{c}(0, t) e^{-\frac{r^2}{4K_L t}} \quad (4.2.6)$$

Si suponemos que la mancha ya no se detecta cuando la concentración disminuye en 100 veces (hasta 1% de la contaminación inicial, es decir  $\bar{c}(r, t) = \bar{c}(0, t)/100$ ), obtenemos:

$$\frac{\bar{c}(0, t)}{100} = \bar{c}(0, t) e^{-\frac{r^2}{4K_L t}} \quad (4.2.7)$$

$$o \quad 100 = e^{\frac{r^2}{4K_L t}} \quad (4.2.8)$$

y transformando (4.2.8), obtenemos el período de tiempo  $t[s]$  de la desaparición de la mancha en función de su tamaño inicial  $r[m]$  y el coeficiente  $K_L$ ,

$$t = \frac{r^2}{4K_L \ln 100} \quad (4.2.9)$$

Por otro lado, según los gráficos de las figuras 1.5 y 1.6 de (Ozmidov, 1990), podemos obtener las dependencias empíricas del coeficiente  $K_L$  en función del tamaño de la mancha con radio  $r$  (m). Es decir, según los resultados de (Okubo, 1971),

$$K_L = e^{1.11 \ln r - 8.22} \quad (4.2.10)$$

y según los resultados de (Okubo y Ozmidov, 1980),

$$K_L = e^{1.25 \ln r - 8.88} \quad (4.2.11)$$

Introduciendo (4.2.10) y (4.2.11) en la expresión (4.2.9), se obtiene el tiempo  $t_0$  [s] según los resultados de Okubo

$$t_0 = \frac{r^2}{e^{1.11 \ln r - 8.22} \ln 100} \quad (4.2.12)$$

y  $t_{00}$  [s] según los resultados de Okubo y Ozmidov,

$$t_{00} = \frac{r^2}{e^{1.25 \ln r - 8.88} \ln 100} \quad (4.2.13)$$

Los resultados de la tabla 4.2.11 y la figura 4.2.12 muestran que para las manchas del mismo tamaño, el tiempo de la persistencia según los resultados empíricos de Okubo de la obtención del coeficiente  $K$  *in situ* es menor que los de Okubo y Ozmidov, que quiere decir que en los experimentos de los últimos autores la dinámica del agua fue menos intensa.

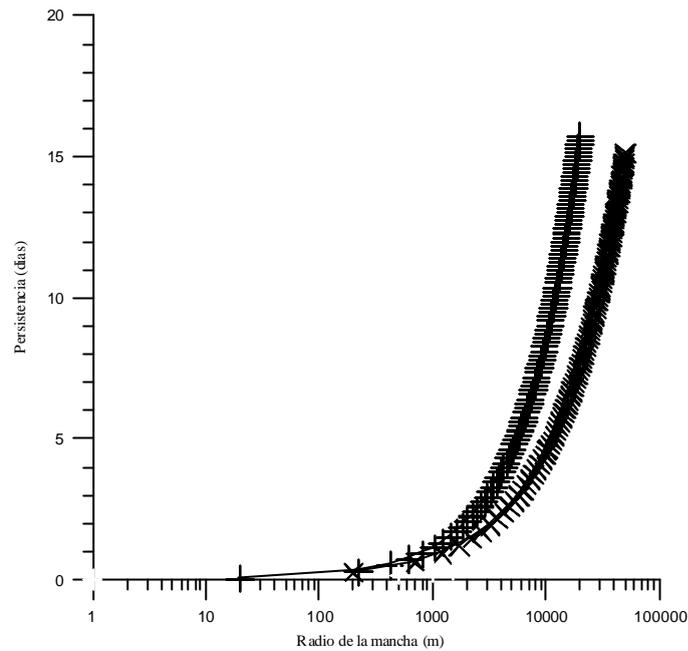


Figura 4.2.12. Persistencia de las manchas en función de su tamaño. Cruces (+) sobre base de los resultados experimentales de Okubo y Ozmidov, (x) – de Okubo.

Tabla 4.2.11. Número total anual de pequeños derrames en aguas costeras de Europa considerando el tiempo de su persistencia según los resultados empíricos de Okuba ( $t_o$ ) y de Okuba y Ozmidov ( $t_{oo}$ ).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Area media de un derrame, Km <sup>2</sup>	N casos en un año	Radio r medio de un derrame, m	ln r	$K_{L0}$ Okubo, m <sup>2</sup> /s	$K_{L00}$ Okubo y Ozmidov, m <sup>2</sup> /s	Persist. $t_o$ , días	Persist. $t_{oo}$ , días	$N \frac{35}{t_o}$ (2)•35/(7)	$N \frac{35}{t_{oo}}$ (2)•35/(8)
0.5	3694	400	5.99	0.209	0.248	0.48	0.40	269354	323225
3.0	4678	1000	6.91	0.577	0.785	1.09	0.80	150211	204662
7.5	1181	1500	7.31	0.900	1.294	1.57	1.09	26328	37922
17.0	469	2300	7.74	1.450	2.214	2.29	1.50	7168	10943
37.5	182	3500	8.16	2.311	3.743	3.33	2.06	1913	3092
75.0	15	4900	8.50	3.370	5.726	4.48	2.63	117	200

Las figuras 4.2.13-14 muestra que considerando su tamaño, el número de derrames pequeños (de hasta 10 Km<sup>2</sup>) aumenta debido a que el tiempo de su persistencia disminuye bastante. En efecto, la probabilidad de detectarlos también disminuye teóricamente. Con las manchas de área mayor (de 10 hasta 75 Km<sup>2</sup>) pasa lo contrario.

Esta consideración de la posible falta de detección de los derrames poco persistentes indica que es probable que la influencia y contaminación debida a los pequeños derrames sea incluso más importante que la mencionada en el apartado anterior de los derrames grandes. El exponente de la Ley de Zipf incluso al efecto de diversos tamaños y persistencias de las manchas parece que es del orden de 1.5, aunque también había que considerar que es excesivo, debido al límite de número de buques en alta mar en un

momento dado y la cantidad total de manchas pequeñas. Eso no quiere decir que no sea significativa la masa total de otros tipos de contaminación a escala incluso menor, como, por ejemplo, las manchas de orden de unos cuantos metros o decímetros procedentes de campamentos turísticos sin infraestructura adecuada, de las embarcaciones deportivas, de pesca, de personas (bronceadores, cremas, etc.).

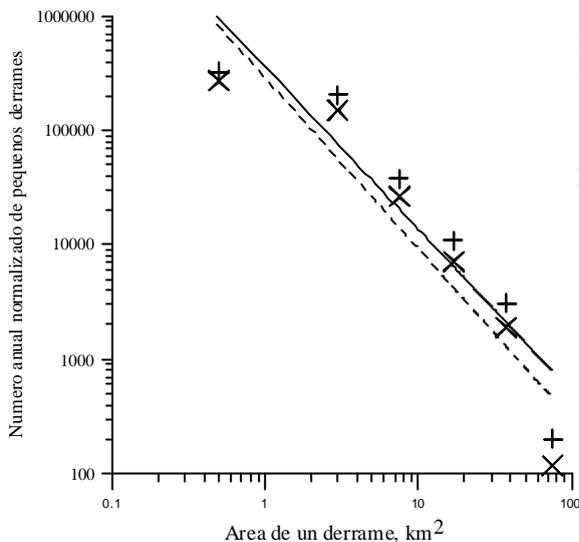


Figura 4.2.13. Número anual total normalizado de pequeños derrames (las columnas 9 y 10 de la tabla 4.2.11) en función de su área media considerando el tiempo de su persistencia según los resultados empíricos de Okubo (cruces (x) y línea punteada) y Okubo y Ozmidov (cruces (+) y línea negras) sobre base de datos de la tabla 4.2.11.

Ajuste de las líneas de aproximación $y=b \cdot ax$ de la figura 4.2.13 según los resultados empíricos de	$b$	$a$	$R$ error cuadrático medio
Okubo (x)	12.58257	-1.4927555	0.883166
Okubo y Ozmidov (+)	12.81182	-1.4230012	0.873457

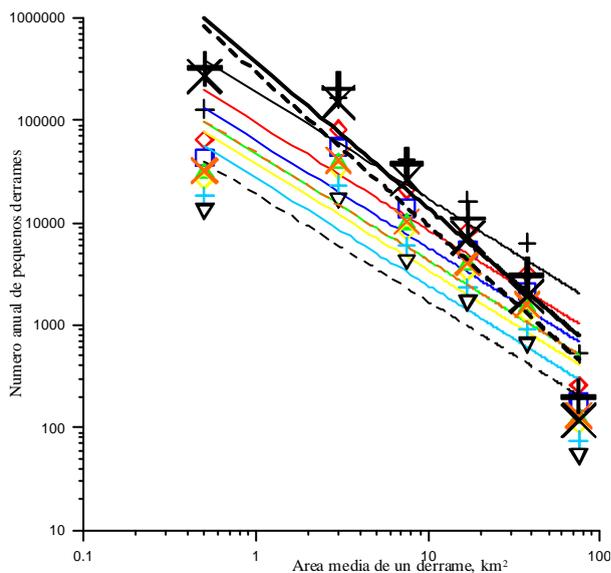


Figura 4.2.14. Comparación de las figuras 4.2.11 y 4.2.13.

La figura 4.2.15 es una versión simplificada de la figura 4.2.13 sin considerar las manchas menores de 0.5 Km<sup>2</sup> y las que son mayores de 75 Km<sup>2</sup>. Esta simplificación fue hecha por dos razones: muchas manchas pequeñas no han sido detectadas debido a la relativamente baja resolución (200 m por un píxel) de la mayoría de las imágenes del SAR y el número de manchas detectadas mayores de 50 Km<sup>2</sup> parece que es bastante pequeño debido al corto período de tiempo de observación (dos años solamente). En la nueva figura, debido a las dichas simplificaciones, la pendiente de ambas dependencias aumentó, lo que

indica en su prolongación una probable existencia de muchas manchas muy pequeñas de orden de decenas de metros, metros o decímetros.

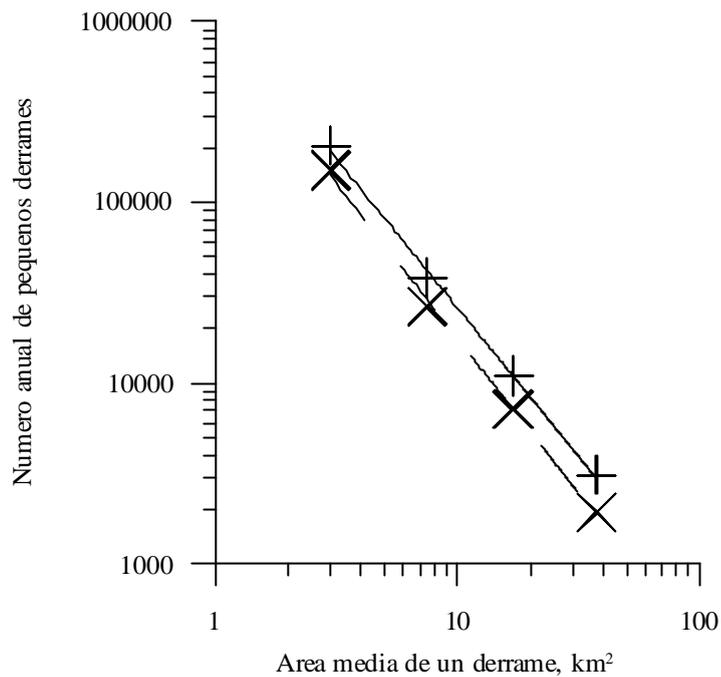


Figura 4.2.15. Número anual de pequeños derrames en función de su área considerando el tiempo de su persistencia según los resultados solo de Okubo (línea punteada) y Okubo & Ozmidov (línea en negrito) sobre base de datos de tabla 4.2.9, pero sin consideración de manchas de área de 0.5 Km<sup>2</sup> y de 75 Km<sup>2</sup>.

Ajuste de las líneas de aproximación y = $b-ax$ de la figura 4.2.15 según los resultados empíricos de	$b$	$a$	$R$ error cuadrático medio
Okubo (x)	13.739	-1.71631	0.998431
Okubo y Ozmidov (+)	13.972	-1.64843	0.998160

Regresar al Índice

Seguir