

APLICACIÓN DEL ANÁLISIS FRACTAL AL ESTUDIO DE LAS ESTRUCTURAS DINÁMICAS EN FLUIDOS MEDIOAMBIENTALES

A. Platónov

Departamento de Física Aplicada
Universitat Politècnica de Catalunya
Jordi Girona 1-3, Campus Nord, Edifici B4
08034, Barcelona, España
alexei@fa.upc.edu

J. Grau Barceló

UE Mecánica, EUETIB.-CEIB
c/ Urgell 187, 08036, Barcelona

J.M. Redondo

Departamento de Física Aplicada
Universitat Politècnica de Catalunya
Jordi Girona 1-3, Campus Nord, Edifici B4
08034, Barcelona, España

Resumen: La aparición de múltiples escalas, que interactúan entre sí en diversos fenómenos físicos medioambientales, especialmente cuando el régimen fluido es turbulento, exige métodos de análisis nuevos. El análisis multi-fractal permite cuantificar el nivel de complejidad geométrica y en algunos casos a partir de una caracterización geométrica se pueden predecir algunos aspectos dinámicos del fluido. Se aplica el método de *Box-Counting* (conteo de cajas) para calcular la dimensión fractal o capacidad de Kolmogorov a observaciones de nubes obtenidas mediante las imágenes de satélite de la Atmósfera (Infrarrojo IR y Visible) y de superficie del Océano (Radar de Apertura Sintética SAR). En todos los casos las diferencias en complejidad entre los distintos tonos de gris detectados en las imágenes de satélites de estructuras atmosféricas, derrames de crudo o penachos de aguas contaminadas en la superficie marina son un reflejo de las condiciones físicas ambientales del medio fluido atmosférico u oceánico y nos permiten entender mejor los procesos dinámicos y de transporte de energía a distintas escalas del flujo analizado.

INTRODUCCIÓN

El estudio de la atmósfera y del océano está fuertemente ligado a la teledetección y a las herramientas de procesamiento de información utilizadas. En ambos casos se estudian flujos complejos con un número de Reynolds elevado. Debido a la no-linealidad de las interacciones fluidas se generan múltiples escalas, observables tanto en las velocidades como en la estructura de los campos escalares, entre ellos la temperatura, la velocidad, la concentración de trazadores, la densidad, etc. Es interesante poder relacionar de alguna forma las características geométricas de observaciones de imágenes del flujo en estudio con sus propiedades físicas y su dinámica.

En este estudio se analizan estructuras nubo-

sas utilizando imágenes Meteosat en el canal visible y en el IR térmico. Con el IR térmico se obtiene información de la temperatura de la parte superior de las nubes y esta está correlacionada con la altura, obteniendo una estructura tridimensional a caracterizar. Por otra parte también se caracterizan estructuras en el mar formadas por la dispersión de derrames de hidrocarburos, se utilizan para este trabajo las imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR). El nexo común de ambas aplicaciones es la utilización de la caracterización fractal y la presentación y versatilidad de la herramienta de cálculo ImaCalc.

Las entidades fractales se caracterizan por presentar autosemejanza a diferentes rangos de escalas de observación, cuando se trabaja con en-

tidades reales se habla de similitud estadística entre diferentes escalas. Otra característica de las entidades fractales es el hecho de ser el resultado de la iteración de procesos simples, llamados generatrices. Estas características se pueden apreciar en las múltiples escalas observables en los flujos complejos.

El análisis fractal nos brinda una herramienta que permite la caracterización geométrica de la estructura de entidades complejas a partir del cálculo de la dimensión fractal. Ésta extiende el significado de la dimensión Euclídea a los números fraccionarios. La generalización de la dimensión geométrica nos permite discernir entre estructuras en función de la complejidad que presentan, a mayor complejidad, mayor dimensión fractal.

Uno de los métodos de cálculo de la dimensión fractal se basa en la obtención del número mínimo de cajas necesarias para recubrir un determinado conjunto (línea, superficie o volumen) $N(\delta)$ en función del tamaño δ de los recubrimientos (o cajas) y $L(\delta)$, la longitud del lado obtenida también a partir del recuento de cajas. El correspondiente cálculo de la dimensión fractal, D , es solo válido en el rango en el que la relación entre N y $L(\delta)$ es potencial y esta bien definida mediante la expresión, (Mandelbrot, 1983; Peitgen *et al.*, 1992):

$$D = \log(N(\delta)) / \log(L(\delta)) \quad (1)$$

Los fenómenos turbulentos suelen ser los que producen cascadas espacio-temporales en el medio ambiente. En ellos se desarrolla una cascada de energía entre las escalas de la producción y las escalas donde se produce la disipación, comportándose de forma distinta si el flujo dominante es tridimensional o bidimensional. En el caso de flujo bidimensional se produce también una cascada inversa de energía, la energía fluye de escalas pequeñas a escalas mayores.

Independientemente del tipo de proceso que genera las escalas más energéticas en el flujo, si existe un subrango donde la producción y la disipación están en equilibrio y este equilibrio es local, de forma similar a la propuesta por Kolmogorov (Kolmogorov, 1941, 1962) para el campo de velocidades, se puede buscar una relación funcional entre la potencia del espectro de energía, $[S] = L^3 T^{-2}$ (o incluso del espectro de la temperatura o de un escalar trazador del fluido) que tiene la forma $S(k) = k^{-\beta}$ y la dimensión fractal D del campo escalar reflejado en la imagen.

Si el proceso reflejado por cualquier propiedad escalar detectable en una imagen es debi-

do fundamentalmente a la advección del campo de velocidades turbulento y podemos medir en un cierto lugar una señal espacial compleja, que no tiene que ser necesariamente la velocidad, compuesta por múltiples escalas de forma que su relación con el número de onda k es de forma potencial, obviando el factor dimensional de proporcionalidad:

$$S(k) = k^{-\beta} \quad (2)$$

Si el exponente es cero, la señal es un producto del ruido, si es 2, significa que tiene su origen asociado con un movimiento de tipo Browniano. Los fenómenos de turbulencia tridimensionales, sin embargo, se caracterizan por un valor de β igual a $5/3$ en un intervalo llamado subrango inercial, siempre que se cumplan las condiciones de la teoría de Kolmogorov, bien la de 1941 K41 o la de 1962 K62, que incluye la intermitencia al aceptar que la disipación turbulenta de energía, ϵ no es constante ni uniforme (ver ecuación 6). En procesos turbulentos bidimensionales el valor de β es mucho mayor (3 o más).

Considerando que la escala $L = 1/k$, la ecuación de la función de densidad espectral también puede expresarse como $S(L)$.

Además, si $V(L)$ es una varianza, calculada a partir de las diferencias de la señal o de las formas del campo escalar observado, E es la dimensión Euclidiana y D es la dimensión Fractal. (Redondo y Linden, 1996), También se cumple:

$$S(f) \approx LV \approx L^{2H+1} \approx L^{2E+1-2D} \quad (3)$$

donde H es la dimensión de Hausdorff, que cumple también la propiedad de ser co-dimensión de la dimensión fractal: $H = E - D$. Usando esta propiedad podemos obtener una relación directa entre el exponente de la función de densidad espectral y la dimensión Fractal $\beta = 2E + 1 - 2D$.

En efecto, la dimensión fractal D , en el caso en que se cumplan las propiedades mencionadas se puede relacionar con el espectro de la turbulencia como:

$$D = E + \frac{1 - \beta}{2} \quad (4)$$

DESCRIPCIÓN DEL ANÁLISIS MULTIFRACTAL

Dimensión box-counting

Una de las diferentes versiones del cálculo de la dimensión fractal de Mandelbrot es la llamada dimensión de *Box-Counting*. Se relaciona con el

concepto de dimensión autosimilar. Otros nombres utilizados son Entropía o Capacidad de Kolmogorov. El método *box-counting* propone la realización de este cálculo mediante una reticulación de la imagen con cajas de lado δ . Seguidamente se obtiene el número de cajas que interseccionan con la entidad de interés.

La zona de análisis tiene un lado L , se escoge un tamaño de caja de lado δ , siendo su longitud función del tamaño de caja, $L(\delta)$. La zona de análisis también puede normalizarse con una escala característica del flujo. A partir de cajas de esta medida se realiza un recubrimiento de toda la imagen correspondiente al fenómeno a analizar. Se cuenta el número de cajas que interseccionan con la entidad de estudio, este valor se asigna a $N(\delta)$ y se repite el proceso para valores distintos de la escala de longitud δ_i , obteniendo los valores correspondientes $N(\delta_i)$. La variación de escala de un paso al siguiente es de $\delta_{i+1} = \delta_i/2$. La existencia de una dimensión fractal única se demuestra con una buena correlación de la recta de regresión de los puntos $\log(N(\delta_i))$ respecto $\log(L(\delta_i))$ siendo:

$$N(\delta_i) = \sum_{R(\delta_i) \cap Z \neq \emptyset} \quad (5)$$

Se necesita una puntualización en la aplicación de esta metodología para matizar el rango de valores de escala utilizables, limitados teóricamente por las dimensiones máximas de la imagen y el tamaño del píxel en el otro extremo. En la práctica, el rango de escalas a estudiar, se traduce a un intervalo menor, debido a la poca información que se tiene en el caso de δ_i igual o superior a la mitad del lado de la imagen y el límite inferior de δ_i corresponde a un tamaño de varios píxel para evitar una saturación en el cálculo de $N(\delta_i)$. La gran ventaja de esta metodología es el hecho de poderse aplicar de forma sistemática debido a la simplicidad en la creación del recubrimiento de cajas y el correspondiente recuento.

Aplicación a imágenes

La información que nos facilitan las diferentes plataformas de teledetección se corresponde generalmente a intensidades observadas organizadas de forma matricial formando imágenes. El problema de la implementación del cálculo de la dimensión fractal con datos experimentales es el cálculo de $N(L)$. También es necesario considerar la identificación del dominio de la imagen que se quiere analizar, definiendo por una par-

te el dominio espacial y por otra el conjunto de intensidades a caracterizar.

La imagen se representa con M_{ij} (i corresponde a la fila y j a la columna), donde el valor en cada punto es la intensidad o nivel de gris (NDG). Sobre esta imagen existe una zona de interés a analizar Z que corresponde a un intervalo de NDG que llamaremos ΔNDG tal que $ij \in Z$ si $M_{ij} \in \Delta NDG$. El método *Box-Counting* se aplica dividiendo el lado L de la imagen en s cajas de igual tamaño ($s = L/\delta$). Estas varían desde la dimensión máxima posible del lado hasta la unidad mínima de la imagen que corresponde a un píxel. Para cada uno de estos valores de s se realiza un recubrimiento de toda la imagen con una disposición regular de cajas de lado $\delta_i = L/s$, denominada $R(\delta)$. Con el recuento de cajas que contienen algún valor de Z en su interior se obtiene el valor de $N(\delta)$.

En la realización del recuento es necesario señalar que se puede dar la situación que una determinada caja contenga valores que estén fuera del intervalo de interés, superiores e inferiores a la vez, pero que no contenga valores del propio intervalo. En esta situación es importante remarcar que se puede achacar a la pérdida de resolución que aparece cuando se realiza una digitalización de una imagen, y en realidad tenemos unos valores ocultos. Una modificación del algoritmo a realizar cuando las intensidades observadas se pueden considerar continuas es el conteo de las cajas que, aunque no tengan propiamente valores pertenecientes al intervalo de intensidades de interés, si que tienen, a la vez, valores superiores e inferiores.

La representación $\log(N(\delta))$ respecto $\log(L(\delta))$ caracteriza a la distribución Z dentro del espacio Euclídeo que la contiene E , y si los puntos aparecen alineados tenemos una dimensión fractal característica que se corresponde a la pendiente de la recta de regresión que pasa por los puntos representativos del rango de escalas. Obviamente las pendientes asociadas a puntos aislados o a rectas en un plano corresponden a los valores Euclídeos de 0 o 1. Si el conjunto es lo suficientemente denso para cubrir totalmente el plano de la imagen a las distintas escalas estudiadas δ_i , entonces el valor de la dimensión es 2. En el caso de conjuntos fractales, si estos están formados por puntos inconexos, el valor de la dimensión fractal estará entre 0 y 2, en el caso que el conjunto forme una línea que se convoluciona a las diversas escalas, su dimensión fractal estará comprendida entre 1 y 2.

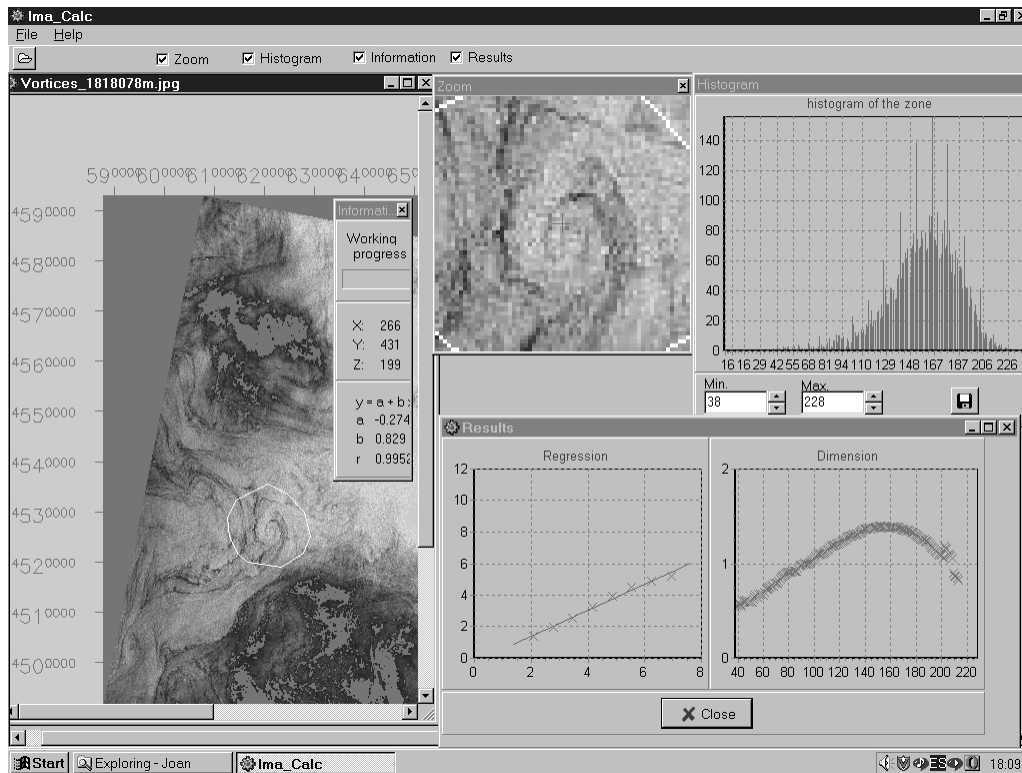


Figura 1. Algunos resultados del cálculo de la dimensión fractal y de otras características adicionales de una imagen del SAR de la superficie del Mar Balear

Caracterización multifractal

Cuando se aplica la caracterización fractal a imágenes, suele ocurrir que la entidad a estudiar presenta las intensidades que la forman distribuidas en un intervalo de NDG suficientemente amplio para no poder ser caracterizado adecuadamente con una única dimensión fractal. Para poder analizar correctamente esta situación se propone una caracterización multifractal.

Esta metodología de análisis divide el intervalo de intensidades a analizar en diferentes subintervalos, para cada uno de estos se realiza la correspondiente caracterización fractal utilizando el método del *Box-Counting*. Ahora se obtiene como resultado una representación de las dimensiones fractales obtenidas frente a las intensidades correspondientes. Un ejemplo de la aplicación del programa usado, con los resultados del histograma de niveles de gris NDG , la curva $N(\delta)$ y la variación de la dimensión fractal en función del nivel de gris, $D(NDG)$ se muestran en la Figura 1.

En esta caracterización se pueden realizar múltiples análisis, pero es primordial asignar un significado a la intensidad observada en la imagen. Puede representar densidad, temperatura,

altura, módulo de la velocidad o vorticidad, etc., algún parámetro físico de interés relacionado con la imagen con estructura espacial autosimilar. Para cada una de estas situaciones podremos hablar de la complejidad observada en función de la intensidad de la magnitud caracterizada y usar la dimensión fractal máxima o bien el propio conjunto $D(NDG)$ para describir la geometría reflejada en la imagen por los procesos físicos inherentes.

En la Figura 1, como ejemplo de un proceso dinámico, un vértice oceánico, que presenta unas características geométricas complejas, se presentan los resultados del cálculo de la caracterización multifractal descrita en el presente artículo, aplicados a un vórtice oceánico. El proceso de cálculo multifractal empieza con una selección del dominio de cálculo de una imagen, en este caso SAR de la superficie del mar (ver apartado Aplicación al Océano). Por una parte se define la región a analizar con la ayuda de un *zoom* interactivo que permite una mayor precisión en la selección, se puede observar tanto la imagen global con la correspondiente selección junto al *zoom* en la parte superior izquierda. El segundo paso a realizar consiste en definir el intervalo de

intensidades de la imagen a utilizar en el cálculo, se puede observar en la parte inferior de la ventana que lleva el título de *Histogram*. A continuación se escoge el incremento de intensidades que se utilizará para recorrer el intervalo de análisis y se asigna el fichero donde se guardarán los resultados del proceso de cálculo.

Una vez empezado el cálculo en modo interactivo se puede ir observando los resultados para cada uno de los subintervalos que se van analizando. En la ventana *Information* aparecen en la parte inferior los resultados de la regresión lineal que nos permite obtener la dimensión fractal. En la ventana que se encuentra en la parte inferior derecha se observan las gráficas correspondientes a los resultados del subintervalo actual de cálculo (izquierda) y del conjunto de subintervalos (derecha). Esta última contiene la caracterización multifractal resultante del análisis (Existe mas información técnica y las versiones del programa de cálculo en la página web <http://prandtl.upc.es>).

Aplicaciones al estudio de la cubierta nubosa

La caracterización de las nubes se vuelve muy importante a la hora de poder estudiar la precipitación y la distribución del viento. Por otra parte, la propia estructura de las nubes se define

como fractal, y diferentes estudios han caracterizado la naturaleza fractal de estas estructuras (Mandelbrot, 1983; Peitgen *et al.*, 1992; Carvalho y Silva Dias, 1998; Gotoh y Fujii, 1998).

Para afrontar su caracterización a partir de imágenes de satélite se necesita de una metodología que pueda trabajar sistemáticamente sobre imágenes y que permita caracterizar superficies. En este caso se ha visto la utilidad de la caracterización multifractal utilizando el método Box-Counting, esta permite incluso caracterizar estructuras tri-dimensionales como las nubes de las que tenemos informaciones en forma de imágenes.

Las imágenes de estudio corresponden a escenas capturadas por el satélite Meteosat-7 con el receptor PDUS de la Universitat Rovira i Virgili correspondientes a los canales visibles (0,3-1,05 μm) e infrarrojo (10-13,10 μm). La zona de captura está centrada en la Península Ibérica y tiene un tamaño de 512×512 píxeles, con una resolución espacial para ambos canales de 5 Km en el nadir. Se ha escogido una zona de estudio de 128×128 píxeles, cuya localización está representada en la Figura 2 (Grau, 2005).

Se han seleccionado dos situaciones diferenciadas que presentan nubes con una estructura cumuloforme (Figura 3) y estratiforme (Figura 4).

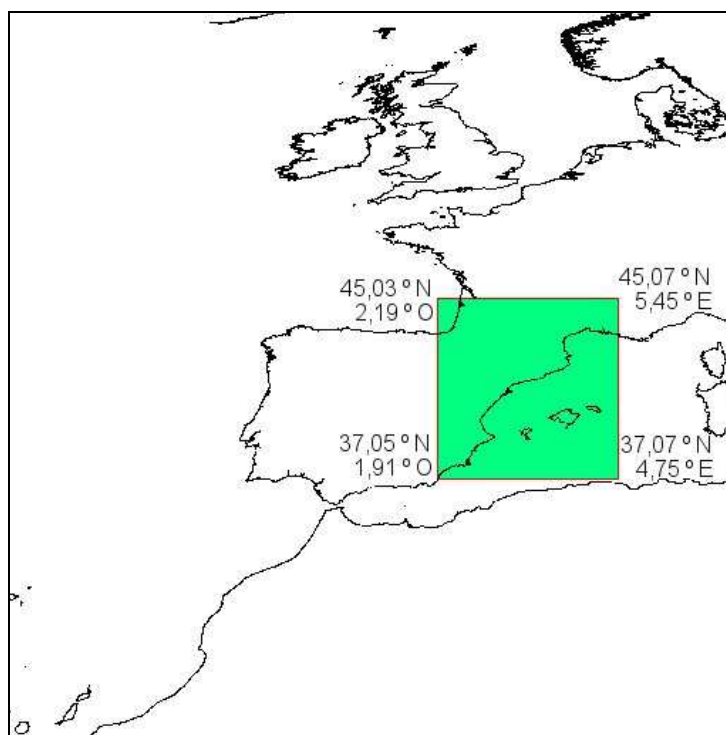


Figura 2. Zona de estudio de las imágenes del METEOSAT

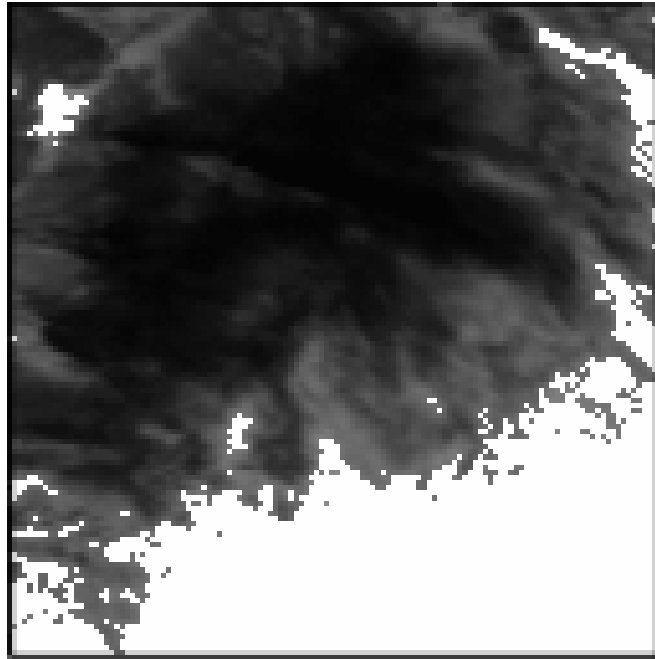


Figura 3. Imagen IR de cubierta de nubes cumuliformes. Se presenta sólo la zona de cálculo

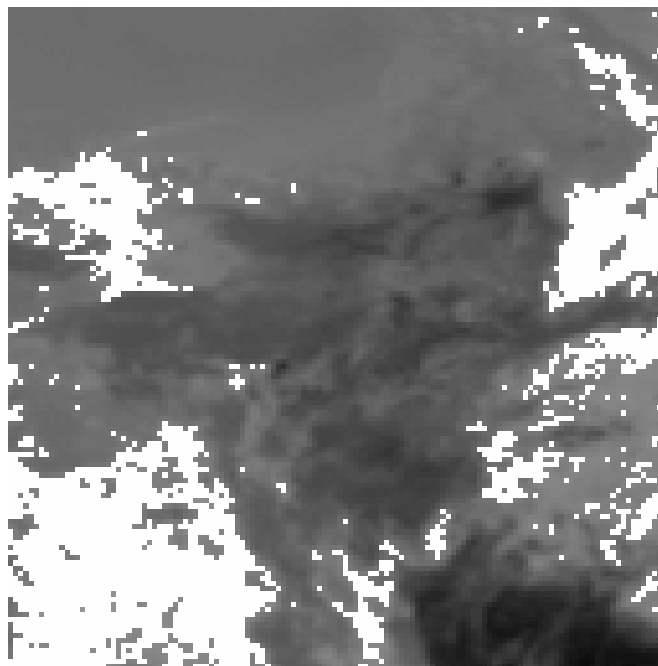


Figura 4. Imagen IR de nubes estratiformes en el tercio superior de la imagen

El análisis se ha realizado escogiendo el intervalo de niveles de gris comprendidos entre 0 y 140 y unos subintervalos con un incremento de 1 *NDG*. La zona de estudio para cada caso es la observada en la correspondiente figura. Los re-

sultados obtenidos se pueden observar de forma normalizada en la Figura 5, representándose para las dos situaciones dinámicas de la atmósfera los valores de la dimensión fractal con una correlación mayor que 0,99.

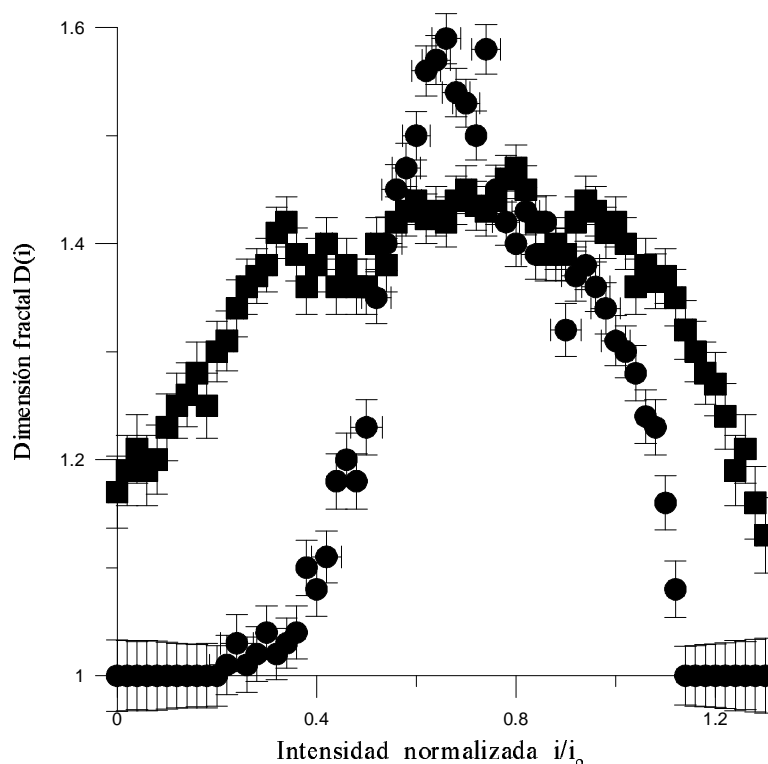


Figura 5. Caracterización multifractal normalizada de las imágenes de las Figuras 3 y 4. Los círculos indican la cubierta estratiforme y los cuadrados la cumuloforme, las barras de error son la desviación estándar en ordenadas y el agrupamiento de valores de gris normalizados en abscisas

En la Figura 3 un análisis visual denota una estructura cumuloforme, apreciándose tanto en el visible como en el IR-Térmico así como en los datos sinópticos del área. Las correspondientes caracterizaciones multifractales (Figura 5 cuadrados) presentan un máximo y un valor promedio no muy diferenciados, dando una idea de una cierta homogeneidad en la distribución de las diferentes dimensiones observadas. Se observa con estos valores una estructura compleja, mostrando la existencia de una estructura tridimensional con núcleos ascendentes y descendentes a distinta temperatura.

En la Figura 4 a diferencia de la anterior, se observa una estructura estratiforme. Esta estructura se caracteriza por unas dimensiones mucho más elevadas para un rango de NDG normalizados (i/i_0) característico de la estructura, así como otros valores más bajos en zonas alejadas del nivel 0,7 en la (Figura 5 círculos). Resultado de esta abrupta variación es la obtención de un máximo muy diferente del promedio. En este caso la estructura tridimensional de la nube es menos importante que la componente bidimensional y es lógico suponer que un aumento del exponente de la potencia espectral disminuya la dimensión multifractal en esos rangos de inten-

sidad según Redondo (1993,1997). Las respectivas caracterizaciones multifractales en la figura 5 permiten apreciar los distintos comportamientos de las nubes cumuloformes y estratiformes, la diferencia local podría usarse de forma automática, no solo para caracterizar la cubierta nubosa, sino para estudiar su evolución y mejorar las parametrizaciones numéricas de la turbulencia en modelos meteorológicos.

Aplicación al Océano

Para evaluar cualitativamente y cuantitativamente el estado de contaminación de la superficie marina de las proximidades de las costas de Cataluña y del Golfo de León, fueron utilizadas imágenes espaciales obtenidas de forma periódica durante los años 1996-2004 mediante los satélites ERS-1/2 con el instrumento de Radar de Apertura Sintética. Se analizaron cerca de 700 imágenes, mayoritariamente del ámbito del proyecto Europeo "Clean Seas" (Jolly *et al.*, 2000; Redondo y Platónov, 2001; Platónov y Redondo, 2003) y "Marine pollution and surface dynamics in the NW Mediterranean Sea" de la ESA (2004-2007).

Las mayores causas de la contaminación del

litoral, así como en mar abierto, son las aguas residuales procedentes de las costas y la pérdida accidental o realizada a propósito de sustancias petroquímicas en alta mar y en las áreas portuarias. Esta última causa está relacionada principalmente con el tráfico marítimo de crudo por petroleros, con los trabajos operacionales portuarios y con la explotación de petróleo mediante las plataformas de alta mar. Cada año se vierten en los océanos cerca de 600.000 toneladas de petróleo como resultado de operaciones habituales de transporte marítimo, accidentes y descargas ilegales (Ministerio de Medio Ambiente, 1999). Actualmente existen numerosos proyectos medioambientales de investigación y de protección del medio marino, en este apartado presentamos como la caracterización fractal de imágenes ayuda a entender los procesos de difusión del crudo y a la detección y discriminación de las causas de la contaminación.

Los resultados de los cálculos de dimensión fractal de las estructuras dinámicas superficiales mediante diferentes imágenes SAR ayudan a evaluar cuantitativamente el espectro de la energía cinética in situ. Utilizando la información adecuada se puede determinar la variabilidad espacial de los coeficientes horizontales de difusión turbulenta en mesoescala $K(x, y)$. Sus valores son muy importantes para los modelos numéricos de transformación y dinámica de derrames de crudo en la superficie oceánica, un método de análisis consiste en la evaluación de las estructuras dinámicas en el mar a partir de la correlación espacial local y de las escalas de longitud aparentes en las imágenes SAR. Los coeficientes locales de difusión turbulenta puede calcular según se describe en (Jolly *et al.*, 2000).

Los procesos fractales ocurren a prácticamente todas las escalas, así cualquier trazador tanto pasivo como activo en un medio turbulento, será afectado por la difusión y eventualmente estará controlado por el espectro de energía local. El análisis multifractal de las estructuras dinámicas obtenidas mediante imágenes SAR en el área de estudio es muy ilustrativo de los procesos de transferencia de energía entre el medio y el propio trazador. Los resultados de este análisis permiten avaluar cuantitativamente la escala de energía in situ relacionada con parámetros dinámicos de la zona, así como cuantificar cuanto tiempo ha estado en el océano un determinado trazador.

El espectro de energía por unidad de masa en

caso de turbulencia medida sobre la superficie del océano viene dada por

$$E(k) = c\varepsilon^{2/3}k^{-\beta} \quad (6)$$

donde c es la constante de Kolmogorov, y ε es la disipación de energía turbulenta, $[\varepsilon] = L^2.T^{-3}$. La dimensión Fractal D , en el caso de una dimensión Euclídea plana de observación $E = 2$, según la ec.(4) se puede relacionar con la pendiente del espectro de una forma sencilla como: $\beta = 5 - 2D$ (Linden *et al.*, 1995; Redondo, 1997).

En la Figuras 6 y 7 se observan una serie de ejemplos de caracterización multifractal de diversas imágenes SAR que reflejan procesos distintos en la superficie del mar, en este caso en nivel de gris *NDG* mencionado en el apartado anterior se corresponde con la rugosidad local (a pequeña escala) de la superficie del mar. Para poder comparar los resultados de la estructura topológica de las imágenes, se han usado niveles de gris normalizados $NDG = i/io$ en cada imagen según el fondo o promedio de la imagen sin tener en cuenta las estructuras visibles, se comparan en la Figura 6 dos imágenes con sus respectivas caracterizaciones multifractales $D(i/io)$ en la Figura 7 de a) un vórtice y b) una estela de petróleo. La distribución típica multifractal $D(i/io)$ de un proceso natural en el océano, que esta sometido a una difusividad horizontal turbulenta $K(x, y)$ tiene forma parabólica. Sin embargo, las manchas o derrames de crudo en la superficie del mar, debido a que la propia estructura geométrica inicial del derrame es Euclídea (línea asociada a una estela o mancha puntual) producen una modificación de la dimensión fractal para valores de *NDG* bajos, que caracterizan la extensión del crudo sobre el mar.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La intención de este trabajo es la de demostrar la utilidad de una nueva herramienta de análisis geométrico útil para procesos complejos donde intervienen múltiples escalas, la turbulencia esta presente muchas veces en los fenómenos ambientales y así hemos aplicado el mismo método multifractal de análisis tanto a la atmósfera como al océano gracias a una interpretación espectral de la transferencia de energía (o temperatura o enstrofia) entre remolinos de diverso tamaño.

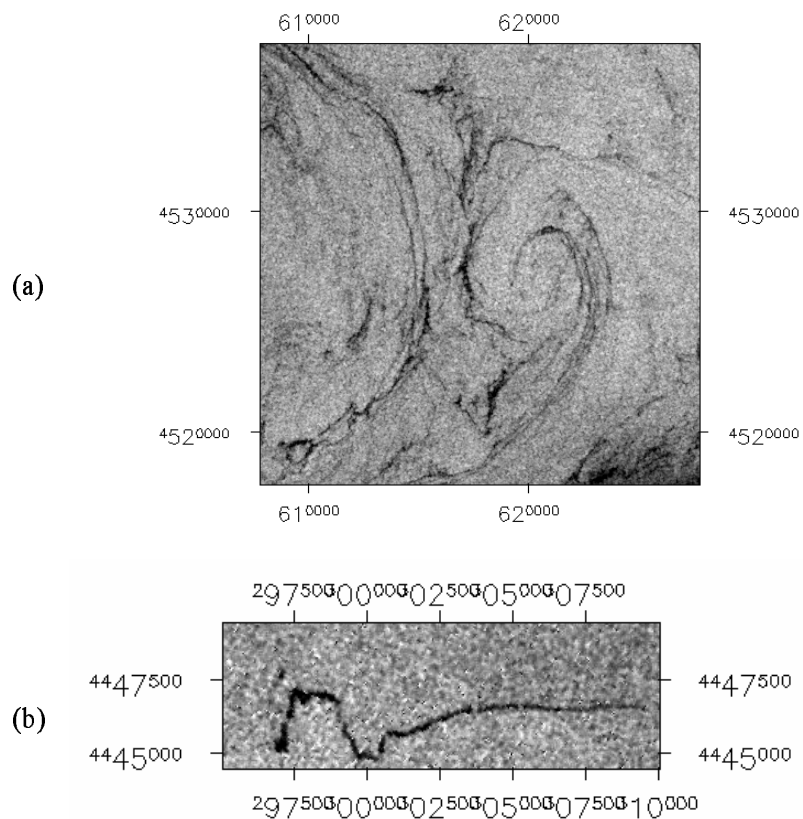


Figura 6. Imágenes SAR. a) Un vórtice (imagen del SAR del 18.07.98). b) Una estela de crudo (imagen del SAR del 13.07.97)

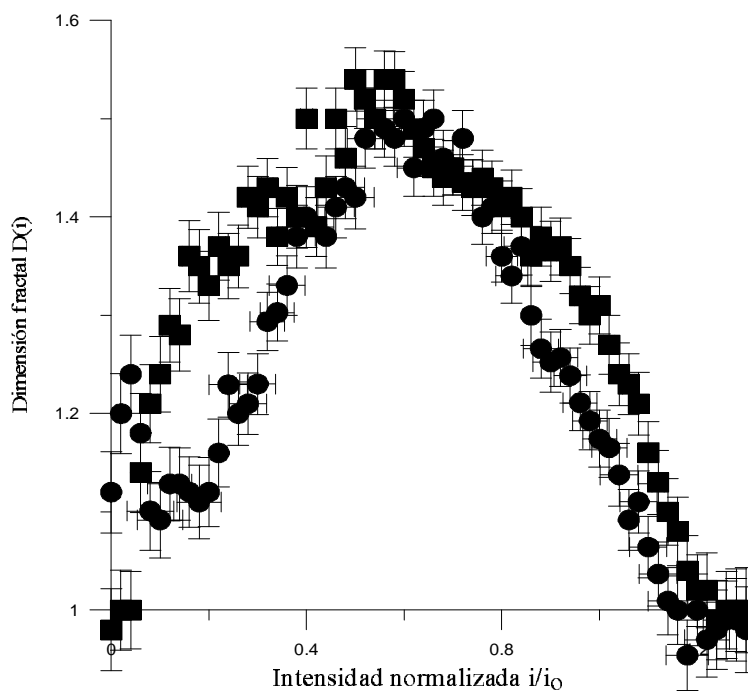


Figura 7. Dimensión multifractal $D(i)$ frente a los niveles de gris normalizado i/i_0 de las imágenes SAR de un vórtice de la figura 6 a (cuadrados); de una estela de petróleo de la figura 6b (círculos)

Se ha estudiado la posible caracterización geométrica multifractal, que puede ser útil para mejorar la parametrización y descripción estadística de la cubierta nubosa. Para tal finalidad se han escogido dos escenas con diferente tipo de cubierta nubosa, con unas características estructurales diferenciadas. La primera con una cubierta cumuloforme con una importante estructura tridimensional y la segunda, con una cubierta estratiforme con una claro desarrollo bidimensional. A la vista de los resultados se puede concluir que la metodología caracteriza de forma diferente las diferentes cubiertas de nubes, dando unos valores que parecen coherentes; mayor cobertura del espacio en un intervalo de *NDG* estrecho da como resultado una mayor dimensión localizada en esos valores de *NDG* pero mucho más baja en los otros y mayor complejidad (el rango de *NDG* de interés es más amplio) en la estructura implica una dimensión no tan alta pero con unos valores más uniformes dentro del intervalo de trabajo. El valor de la dimensión fractal en éste caso indica si hay muchos o pocos puntos en el determinado intervalo y su correspondiente dispersión espacial. La variación de la dimensión fractal de un intervalo a otro indica la estructura de las nubes para los diferentes niveles de gris, que para la imagen del IR térmico se pueden asociar a una altura.

En el caso del estudio de la radiación electromagnética del SAR, que nos indica la rugosidad a pequeña escala de la superficie del mar hemos visto que una descripción multifractal de diferentes fenómenos oceanográficos, incluyendo la detección de derrames de petróleo, permite discriminar los diversos casos de polución y sobre todo el tiempo de persistencia del derrame. Gade y Redondo (1999), Gade y Alper (1999), Platónov *et al.* (2001); Redondo y Platónov (2001).

Así como el límite superior de las escalas turbulentas en la Atmósfera son unos 1000 Km dados por el tamaño de las borrascas o anticiclones, en el océano sin embargo dichas escalas, asociados a los remolinos detectados en la superficie del mar son mucho menores (10-100 Km). En ambos casos el equilibrio entre la estratificación y la rotación define el radio de deformación de Rossby, donde estas dos fuerzas másicas están en equilibrio. Entonces esta escala puede calcularse como:

$$Rd(x, y) = Nh/f \quad (7)$$

siendo *N* la frecuencia de *Brunt-Vaisalla*, *h* una profundidad típica donde se produce el cambio de densidad y *f* el parámetro de Coriolis definido como: $f = 2\Omega \sin \varphi$, donde Ω es la velocidad angular de rotación de la Tierra y φ es la latitud.

El rango físico de escalas relevantes en el proceso geofísico en estudio es fundamental para establecer el rango del comportamiento fractal desde las zonas o escalas mas energéticas, usualmente $Rd(x, y)$, hasta las escalas mas disipativas o de Kolmogorov. En procesos medioambientales no-homogéneos, este rango no será generalmente inercial ni estará en equilibrio local (según las teorías de Kolmogorov 1941,1962). Normalmente los valores $Rd(x, y)$ dependen de la zona y de sus condiciones pero el hecho de que la turbulencia atmosférica es no-homogénea implica que las cascadas de energía y enstrofia se producen tanto en el espacio físico como en el espectral, por eso las caracterizaciones de las imágenes de satélite deben hacerse de forma local. Distintos procesos físicos tendrán un reflejo característico de la geometría a multi-escala dominante, pero es difícil que exista una relación unívoca entre la geometría fractal y la dinámica local, ya que distintos procesos pueden producir la misma geometría a multi-escala de todas formas el método propuesto puede usarse como una técnica útil en observación remota.

En la Figura 8 se observa claramente la diferencia entre la distribución de la dimensión fractal para distintos niveles de gris (*NDG*) de las imágenes del SAR de dos fenómenos distintos tales como células de convección (a) y el reflejo de ondas gravitatorias atmosféricas sobre el mar (b). Los resultados del análisis multifractal muestran, según se ve en la figura 9, la distinta topología entre las ondas atmosféricas de una estructura fractal, relativamente simple, y las células de convección inducida en la superficie marina, de estructura autosimilar más compleja. El mismo tipo de diferencias se puede usar para distinguir entre las trazas debidas a aceites o derrames antropogénicos de contaminantes y trazas superficiales asociados al plancton, a algas o a biología marina según se ve en la Figura 7. En estos casos una diferencia clara también se debe al tiempo de residencia de un trazador en un ambiente dinámico turbulento, tal como el que existe en la superficie del mar, caracterizado por una difusividad $K(x, y)$ y un Radio de deformación de Rossby $Rd(x, y)$ que también depende de la zona y de otros factores como la presencia de la termoclina, viento, oleaje, corrientes, etc. El mismo tipo de diferencia entre los valores fractales de los distintos niveles de IR, relacionados con la temperatura y la altura de las nubes, permite distinguir las estructuras más tridimensionales de los cúmulos y las bidimensionales (planas debidas a la estratificación) de los estratos (Figuras 3 a 5).

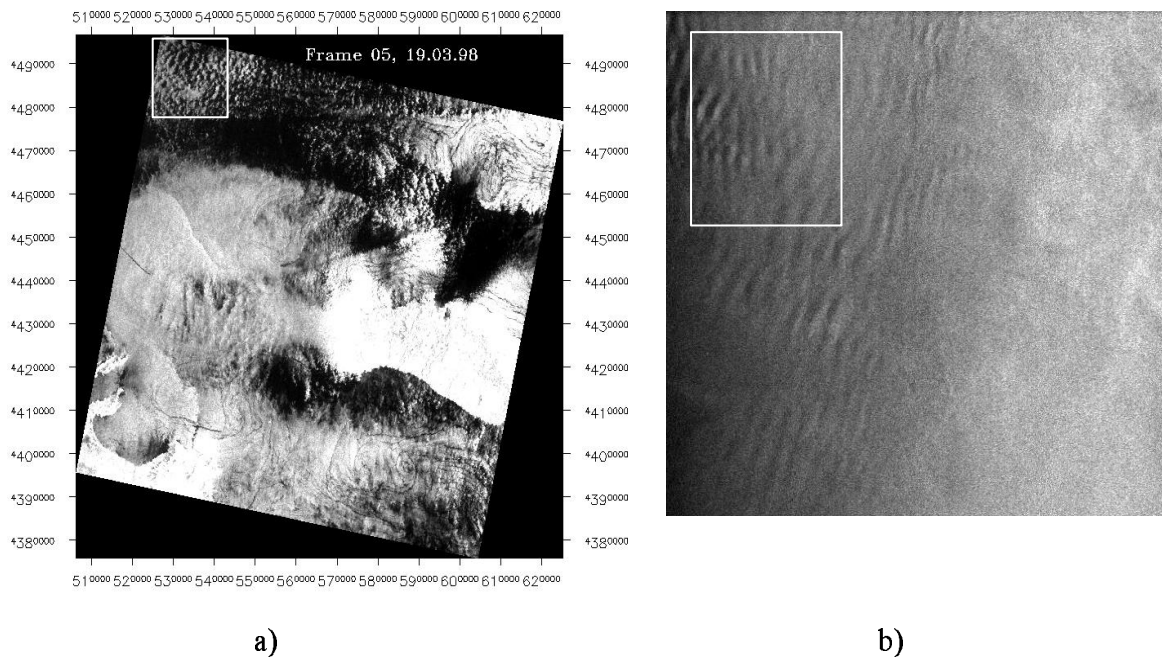


Figura 8. Imágenes del SAR (100 Km × 100 Km) muestran las células de convección (a) y las ondas gravitatorias atmosféricas (b) detectadas

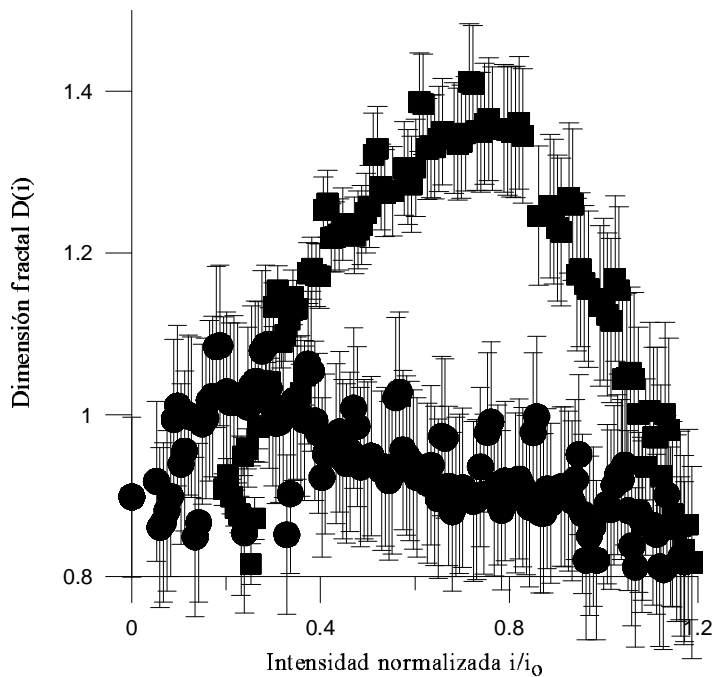


Figura 9. Resultados de análisis multifractal de las células de convección (cuadrados) y las ondas gravitatorias atmosféricas (círculos) detectadas en imágenes del SAR da la Figura 8 a) y b)

La posibilidad de detectar claramente las estelas de barcos o aviones u otros procesos Euclídeos antropogénicos en un océano o una atmósfera turbulentos puede ser de gran utili-

dad, tanto en estudios medioambientales como en la implementación de técnicas de teledetección para una policía medioambiental mediante satélites.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Ministerio de Educación y Ciencia MEC de España (RyC-2003-005700, FTN-2001-2220) por su ayuda financiera. También agradecemos a EUMETSAT por las imágenes METEOSAT y a la Agencia Espacial Europea por las imágenes SAR (proyecto ESA-AO-ID CIP.2240).

REFERENCIAS

- Carvalho L.M.V. y Silva Días M.A.F., (1998). An application of fractal box dimension to the recognition of Mesoscale cloud patterns in infrared satellite images. *Journal of Applied Meteorology*, 37, 10, 1265–1282.
- Gade, M. y Redondo J.M., (1999). Marine pollution in European coastal waters monitored by the ERS-2 SAR: a comprehensive statistical analysis. *IGARSS 99, Hamburg*. Vol. III, 1637–1639, 308–312.
- Gade, M. y Alper, W., (1999). Using ERS-2 SAR images for routine observation of marine pollution in European coastal waters. *The Science of the Total Environment*, Vol. 237/238, 441–448.
- Gotoh, K. y Fujii, Y., (1998). A fractal dimensional analysis on the cloud shape parameters of cumulus over land. *Journal of Applied Meteorology*, 37, 10, 1283–1292.
- Grau, J., (2005). *Procesado digital de imágenes aplicado al análisis de secuencias Meteosat*. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Jolly, G.W., A. Mangin, F. Cauneau, M. Calatayud, V. Barale, H.M. Snaith, O.Rud, M. Ishii, M. Gade, J.M. Redondo y A. Platónov., (2000). The Clean Seas Project (ENV4-CT96-0334), Final Report, <http://www.satobsys.co.uk/CSeas/report.html> Δ DG XII/D of the European Commission under contract No. ENV4-CT96-0334, Bruselas, 1–75.
- Kolmogorov, A.N., (1941). Local structure of turbulence in an incompressible fluid at very high Reynolds numbers. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 30, 299–303.
- Kolmogorov, A.N., (1962). A refinement of previous hypothesis concerning the local structure of turbulence in a viscous incompressible fluid at high Reynolds number. *J. Fluid Mech.*, 13, 82–90.
- Linden, P.F., Redondo, J.M. y Youngs, D.L., (1995). Molecular mixing in Rayleigh Taylor instability. *J. Fluid Mech.*, 265, 97–124.
- Mandelbrot, B., (1983). *The fractal geometry of Nature*. Freeman, New York. Ministerio de Medio Ambiente, 1999. *El Medio Ambiente Marino*, Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, España, 7–8.
- Peitgen, H.-O., Jürgens H. y Saupe D., (1992). *The Fractals in the Classroom: Part One - Introduction to Fractals and Chaos*. Springer-Verlag, New York, 1992, pp. 240–244.
- Platónov, A. y Redondo, J.M., (2003). Contaminación superficial del Mediterráneo Noroccidental: detección de derrames de crudo. *Ingeniería del Agua*, Vol. 10, No 2.
- Platónov, A., Redondo, J.M. y Grau, J., (2001). Water wash spill pollution danger in NW Mediterranean: statistical analysis of two-year satellite observation. *Proceedings of Maritime Transport 2001*, Olivella *et al.* (Eds.), UPC, Barcelona, 325–334.
- Redondo, J.M., (1997). Fractal Characteristics of Reactive Fronts and Shock Tube. *Mixing Layers in Proceedings of 6th International Workshop on the Physics of Compressible Turbulent Mixing*, G.Jourdan y L. Houas (Eds.), pp. 2–427.
- Redondo, J.M., (1993). Fractal models of density interfaces. *Institute of Mathematics and its Applications series*, Vol. 43, 353–370, Oxford University Press.
- Redondo, J.M. y Linden, P.F., (1996). Geometrical observations of turbulent density interfaces. *Institute of Mathematics and its Applications series*, Vol. 56, 221–248, Oxford University Press.
- Redondo, J.M. y Platónov, A., (2001). Aplicación de las imágenes SAR en el estudio de la dinámica de las aguas y de la polución del Mar Mediterráneo cerca de Barcelona. *Ingeniería del Agua*, Vol. 8(1), 15–23.