

Técnicas multifractales para la extracción de la función de corriente a partir de imágenes de la superficie del mar

A. Turiel, V. Nieves y E. García-Ladona
{turiel,vnieves,emilio}@icm.csic.es

Institut de Ciències del Mar (CSIC). Passeig Marítim de la Barceloneta 37-49. 08003 Barcelona

RESUMEN

Uno de los grandes retos de la teledetección oceánica es la obtención de magnitudes dinámicas relevantes a partir de imágenes de satélite de trazadores de diversos tipos (e.g. temperatura superficial, concentración de clorofila, etc). En este artículo discutimos cómo el uso de nuevas técnicas de análisis de singularidades permiten recuperar las principales líneas de corriente instantáneas, y cómo éstas pueden ser usadas, dentro de la aproximación geostrofica, para deducir la función de corriente asociada, con mejor resolución espacio-temporal que otras técnicas similares. Así mismo, discutiremos algunas otras aplicaciones potenciales de este método.

PALABRAS CLAVE: análisis de singularidades, detección de estructuras, estimación del movimiento, multifractalidad.

ABSTRACT

One of the greatest challenges in the remote sensing of the ocean is the obtention of relevant dynamical quantities from satellite images of different tracers (e.g., SST, chlorophyll concentration, etc). In this paper we will discuss how the use of new techniques on singularity analysis allow to retrieve the main instantaneous stream lines, and how these can be used, in the context of the geostrophic approximation, to deduce the associated stream function, with better spatial and temporal resolution than other methods. Besides, we will discuss some of the potential applications of this method.

KEY WORDS: singularity analysis, pattern recognition, motion estimation, multifractality.

INTRODUCCIÓN

La obtención de imágenes de satélite adquiridas en diversos rangos de frecuencias nos permite acceder a estimaciones razonables del valor de determinadas variables intensivas (como la temperatura superficial del mar –SST–) sobre áreas determinadas por la capacidad resolutive de la malla de captores utilizada. Estas variables proporcionan información sobre el estado termodinámico del mar, pero no dan información directa sobre el movimiento de las masas de agua. Sin embargo, la estructura y distribución de estas variables no es completamente aleatoria, sino que viene determinada por la evolución pasada y movimiento presente del océano, ya que se comportan como trazadores más o menos pasivos. Con todo, extraer el campo de velocidades a partir de estas variables es un *problema inverso* muy complejo e irresoluble en la práctica sin las aproximaciones convenientes.

La estimación más directa del campo de velocidades es conseguida por los satélites altimétricos, los cuales nos proporcionan mediciones del nivel de elevación del mar, a partir del cual se puede deducir el campo de corrientes en la aproximación geostrofica. Sin embargo, los satélites altimétricos sólo proporcionan información a lo largo de la traza del satélite, así que se debe combinar la información de diversas trazas por medio de técnicas de análisis objetivo (LeTraon *et al.*, 1998) para obtener verdaderos mapas de altimetría. Dado que las trazas son adquiridas de modo no simultáneo, los mapas así contruidos sólo podrán considerarse sinópticos a escalas suficientemente grandes. En latitudes medias y con la red actual de satélites altimétricos se puede conseguir construir mapas de resolución razonable para el tamaño de la mesoescala (~30 Km) cada 10 días, aproximadamente.

Aún cuando la resolución espacial y temporal de los mapas altimétricos es adecuada para el

estudio de muchos fenómenos de interés oceanográfico, ésta dista mucho de lo que sería deseable para aplicaciones más operacionales. Hace ya más de 20 años se han propuesto múltiples aproximaciones para extraer el campo de velocidades directamente de las imágenes de trazadores. Todos los métodos se basan en el seguimiento de estructuras observables en los trazadores a través de secuencias de imágenes; citemos aquí el método MCC (Emery *et al.*, 1986; García y Robinson, 1989) y el *Optical Flow* (OF) (Béréziat y Berroir, 2000). Estos métodos implican una pérdida en resolución espacial y temporal, lo que conduce a campos de velocidad resueltos sólo ligeramente mejor que los altimétricos.

Recientemente, se ha propuesto un nuevo método –denominado Método de la Función de Corriente Máximo Singular, FCMS– para la evaluación de la función de corriente a partir de imágenes de trazadores (Turiel *et al.*, 2005). Dicho método se basa en las propiedades de multifractalidad inducidas en el trazador por la estructura turbulenta del campo de velocidades subyacente. El método permite hacer una obtención muy fina de estructuras y garantiza la mejor resolución espacial y temporal posible: los campos de velocidad tienen la resolución espacial de las imágenes de partida, y son instantáneos. Sin embargo, los campos necesitan ser re-calibrados localmente, ya que el método sólo proporciona velocidades adimensionalizadas.

En este artículo haremos una revisión de este método y discutiremos sus aplicaciones potenciales y extensiones futuras

MÉTODO DE LA FUNCIÓN DE CORRIENTE MÁXIMO SINGULAR

Análisis de singularidades

El análisis de singularidades se basa en que, en un fluido turbulento, todas las variables dominadas por la mecánica del fluido acaban siendo dominadas por la intermitencia. Esto implica que sus valores, aún cuando son extremadamente caóticos, han de seguir una estadística caracterizada por una distribución infinitamente divisible, con modas pequeñas y colas largas y pesadas (elevada curtosis) (Dubrulle 1994). Esto implica, en añadidura, que la relevancia de una estructura en la organización del fluido es local y por tanto no se

han de buscar umbrales globales, sino locales y adaptados al seguimiento de la cascada multiplicativa predicha por la teoría estándar de la Turbulencia Completamente Desarrollada. Esta relevancia local de cada punto viene medida por el exponente de singularidad local, $h(\mathbf{x})$, que se calcula por proyección de wavelets a diversas escalas. Si la señal a analizar es $s(\mathbf{x})$, dada una wavelet (para nosotros, función escalable) $\Phi(\mathbf{x})$, definimos la proyección de s sobre F a la escala r y el punto $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^2$ como:

$$T\Phi s(\mathbf{x}, r) = r^2 \int dy \Phi((\mathbf{x}-\mathbf{y})/r) s(\mathbf{y})$$

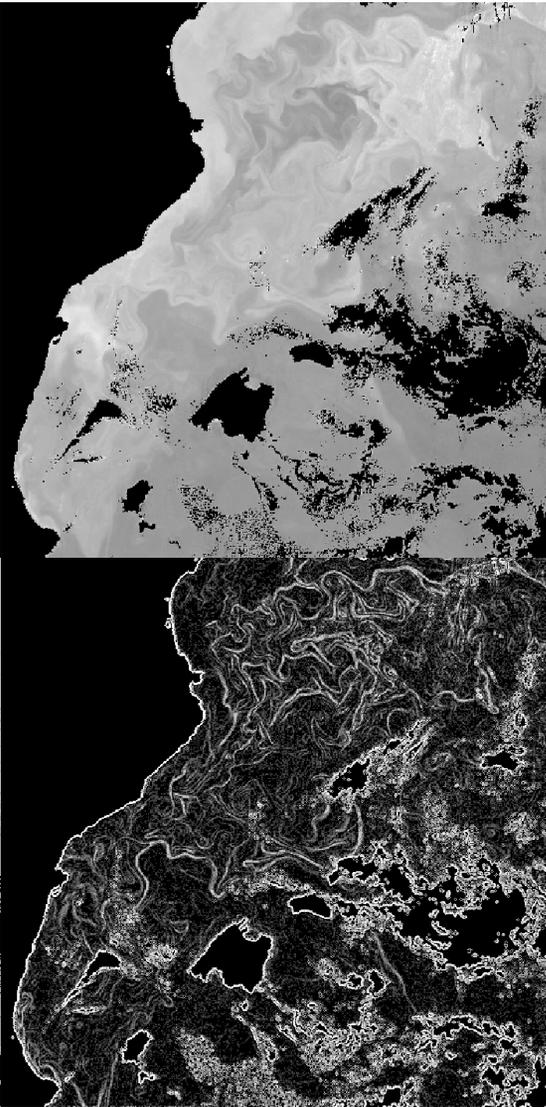
La proyección en wavelets permite hacer un zoom local –regulado por el parámetro de escala r – sobre el comportamiento de s alrededor del punto \mathbf{x} , y por eso es útil para determinar su estructura. En sistemas dominados por la turbulencia del fluido subyacente se ha podido comprobar (Frisch 1995; Arneodo *et al.*, 1995) que las proyecciones en wavelet del gradiente de la señal dependen del parámetro de escala r como una ley de potencias, esto es,

$$T\Phi |\nabla s|(\mathbf{x}, r) = \alpha(\mathbf{x}) r^{h(\mathbf{x})}$$

El exponente de singularidad local $h(\mathbf{x})$, que no depende de la wavelet (Arneodo *et al.*, 1995), nos permite caracterizar localmente la regularidad o irregularidad de la función en ese punto; valores menores de $h(\mathbf{x})$ (típicamente negativos) indican un comportamiento más irregular y singular, mientras que a medida que $h(\mathbf{x})$ crece la función se vuelve más suave y se aproxima más a su desarrollo de Taylor. Una señal que posee exponentes de singularidad en todos sus puntos se dice multifractal, debido a que los conjuntos asociados a cada valor del exponente se organizan como fractales de diferentes dimensiones (Frisch 1995). Los escalares en el océano suelen presentar estructura multifractal (Figura 1).

Construcción de la FCMS

Indicios teóricos y experimentales de datos oceánicos (Abraham y Bowen, 2002) y resultados teóricos recientes (sin publicar) muestran que las singularidades son advectadas por el fluido. La interpretación física de esta conservación es que, cuando la turbulencia está completamente desarrollada, las singularidades $h(\mathbf{x})$ están en equilibrio



***Figura 1.** Arriba: Imagen de concentración de clorofila en niveles de gris en escala logarítmica, obtenida del satélite SeaWiFS (procesamiento OC4). Abajo: Singularidades locales obtenidas; los colores más brillantes corresponden a exponentes más singulares. Las líneas de costa y transiciones océano-nube son muy singulares, así como las líneas frontales; sin embargo, otras estructuras más sutiles, corrientes y meandros también aparecen destacados.

dinámico con el campo de velocidades. Podemos usar esta propiedad para derivar un campo de velocidades 2D, lo que puede aplicarse también en el caso del océano cuando la hipótesis cuasi-geostrófica es válida. Diseñamos a este fin un algoritmo

que se basa en construir la función de corriente Y a partir de información sobre las líneas de corriente principales. Turiel y del Pozo (2002) demostraron que se puede reconstruir una señal multifractal a partir de su gradiente restringido a un subconjunto fractal particular, la llamada Variedad Más Singular (VMS en lo que sigue). El algoritmo para la generación de la función de corriente (Función de Corriente Máximo Singular (FCMS), denotada por Ψ_M) procede en dos pasos:

1. Se calculan los exponentes de singularidad de todos los puntos, y se separan aquellos asociados al valor más singular (con cierta dispersión experimental). Esto determina la VMS (líneas de corriente principales; ver Figura 2).
2. Se asigna un valor consistente al gradiente de Ψ_M sobre la VMS. Como Y_M es una función de corriente, $\nabla\Psi_M$ ha de ser perpendicular a las líneas de corriente de la VMS; pero nos falta determinar su módulo y sentido. Como carecemos de esta información dinámica, tomamos $\nabla\Psi_M$ de módulo constante, adimensional, y con el mismo sentido del gradiente de la señal original, ∇s . A continuación, reconstruimos como en Turiel *et al.* (2002); ver Figura 3.

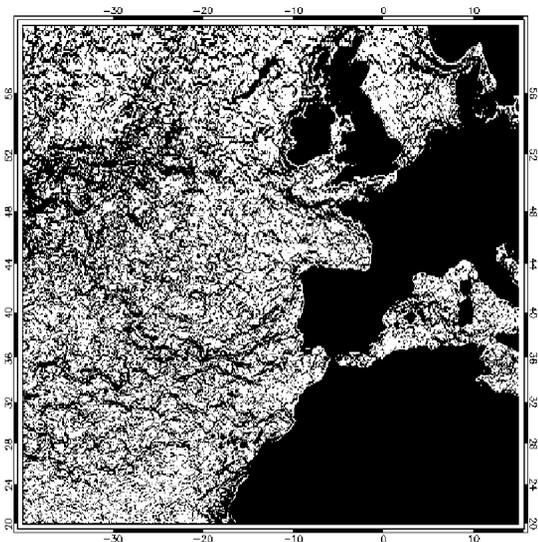


Figura 2. Variedad Más Singular, derivada de una imagen de SST analizada del 14 de Abril de 2006 (Fuente: <http://www.ifremer.fr/las/servlets/dataset>).

Todas las figuras precedidas de asterisco se incluyen en el cuadernillo anexo de color

Esta construcción nos permite obtener una función de corriente adimensional que posee propiedades importantes; en particular, posee las mismas líneas de corriente de la función de corriente original si las singularidades son advectadas. Comparaciones directas con mapas de altimetría muestran una buena correspondencia en la mesoescala (ver Figura 4). Sin embargo, para poder dar un uso operacional a la FCMS, ésta ha de ser calibrada para retornar valores de velocidad con dimensiones adecuadas. Además, la hipótesis de celeridad constante sobre la VMS puede fallar localmente y, lo que se muestra como más importante en los experimentos, el sentido puede estar invertido si el gradiente del escalar original no apunta en la misma dirección del gradiente de densidad.

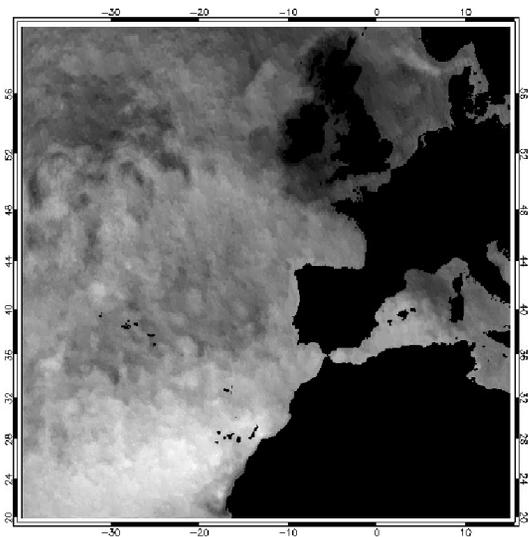


Figura 3. Función de corriente máximo singular derivada.



Figura 4. Superposición de las curvas de nivel de un mapa altimétrico sobre la FCMS derivada de SST analizada en la zona de cabo Hatteras. La imagen de SST original fue obtenida el 31 de Diciembre de 2003.

EXTENSIONES Y LINEAS FUTURAS

Calibración de la FCMS

El mayor punto débil de la FCMS son las hipótesis de celeridad constante y co-alineación con el gradiente de la señal. Sin embargo, si alguna información dinámica adicional está accesible es muy sencillo implementarla en la construcción: simplemente, se sustituye $\nabla\Psi_M$ en la VMS por el valor apropiado y se reconstruye de la misma manera que antes. Resultados preliminares integrando datos altimétricos muestran una gran calidad y buena correspondencia con la función de corriente real (Isern-Fontanet *et al.*, 2006).

Detección de estructuras oceánicas

El análisis de singularidades en sí mismo es una poderosa herramienta para la extracción de estructuras, dado que los exponentes $h(\mathbf{x})$ permiten detectar transiciones que son localmente importantes aunque sean globalmente irrelevantes; además, por construcción, estos exponentes proporcionan una medida que es invariante de escala, por lo que no se prefiere el tamaño de la detección. Como un caso particular de interés oceanográfico, recientemente se ha aplicado esta técnica a imágenes del satélite MeteoSat para detectar frentes de ondas internas de varios cientos de kilómetros propagándose en mar abierto cerca de la Cresta de Mascarene (Turiel *et al.*, 2006); ver Figura 5. El interés de este trabajo es que permitiría reanalizar bases de datos de imágenes buscando indicios semejantes; se ha de notar que la presencia de estos frentes de ondas internas

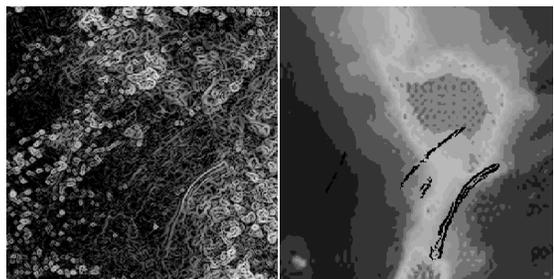


Figura 5. *Izquierda:* Singularidades de una imagen del MeteoSat del 26 de Diciembre de 2004, en la cresta de Mascarene (NE de Madagascar; el área mostrada va de 57.5° E a 62.5° E en longitud, y de 14.75° S a 8.25° S en latitud). Las singularidades frontales del centro de la imagen son frentes coherentes de ondas internas. *Derecha:* Superposición de los frentes sobre la batimetría. El frente se amplifica en el canal entre mesetas.

A. Turiel, V. Nieves y E. García-Ladona

era desconocida en la zona observada, ya que se pensaba que la cresta actuaba como un muralla y no había propagación al lado oeste.

CONCLUSIONES

En este artículo hemos visto que la técnica del análisis de singularidades para el tratamiento de datos en teledetección oceánica es una herramienta primordial para la obtención de magnitudes físicamente significativas. El análisis de singularidades resulta especialmente apropiado ya que los datos poseen una estructura caótica determinada por la turbulencia de alto número de Reynolds del océano, y por tanto toda la teoría de turbulencia es aplicable. Es precisamente esta teoría la que predice la organización del fluido en frentes de singularidad, los cuales forman variedades materiales y por tanto conservadas por la evolución.

Gracias a esas propiedades de conservación, hemos visto que se pueden derivar fácilmente aproximaciones instantáneas de la función de corriente geostrofica. Además, el método es fácilmente escalable para integrar información dinámica adicional cuando ésta está disponible.

La técnica de clasificación de singularidades, aunque adaptada para el tratamiento de variables termodinámicas donde la advección domina, es también de utilidad para el tratamiento de imagen en general, y así su enorme sensibilidad (ya que se basa en una caracterización local e independiente de la escala) la hace apropiada para detectar ondas que modulan sólo sutilmente la señal percibida por el satélite; así, hemos visto que se puede usar análisis de la singularidad para detectar ondas internas en imágenes del espectro visible.

AGRADECIMIENTOS

A. Turiel disfruta de un contrato Ramón y Cajal financiado por el MEC. Este trabajo es una contribución a los proyectos ESEOO (VEM2003-20577-C14-10) y MERSEA (EU AIP3-CT-2003-502885).

BIBLIOGRAFÍA

- ABRAHAM, E. y BOWEN, M. 2002. Chaotic stirring by a mesoscale surface-ocean flow. *Chaos* 12: 373-381
- ARNÉODO A., ARGOUL, F., BACRY, E., ELEZGARAY J., y MUZY J. -F.1995. *Ondelettes, Multifractales et Turbulence*. Diderot Editeur, París.
- BÉRÉZIAT, D., y BERROIR, J. 2000. Motion Estimation on Meteorological Infrared Data using a Total Brightness Invariance Hypothesis. *Environ. Model. Soft.* 15: 513-519
- DUBRULLE, B. 1994. Intermittency in fully developed turbulence: Log-Poisson statistics and generalized scale covariance. *Phys. Rev. Lett.* 73:959-962
- EMERY, W. J., THOMAS, A. C., COLLINS, M. J., CRAWFORD W. R. y MACKAS, D. L. 1986. An objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images *J. Geophys. Res.* 91:12865-12878.
- FRISCH, U. 1995. *Turbulence*. Cambridge University Press, Cambridge
- GARCÍA, C. A. y ROBINSON, I. S. 1989. Sea surface velocities in shallow seas extracted from sequential coastal Zone Color Scanner satellite data. *J. Geophys. Res.* 94 (C9): 12681-12691.
- ISERN-FONTANET, J., TURIEL, A. y GARCÍA-LADONA, E. (enviado). *J. Geophys. Res.*
- LETRAON,, P., NADAL, F. y DUCET, N. 1998. An improved mapping method of multisatellite altimeter data. *J. Atmos. Ocean. Tech.* 15: 522-533.
- TURIEL, A. y DEL POZO, A. 2002. Reconstructing images from their most singular manifold. *IEEE Trans. Image Processing* 11: 345-350.
- TURIEL, A., ISERN-FONTANET, J., GARCÍA-LADONA, E. y FONT, J. 2005. Multifractal Method for the instantaneous evaluation of the Stream Function in Geophysical flows. *Physical Rev. Lett.* 95: 104502
- TURIEL, A., ISERN-FONTANET, J., GARCÍA-LADONA, E. y YOUNG J. (en prensa). Detection of wave fronts in the Indian Ocean from geostationary satellite imagery. *Int. J. Rem. Sens.*