

# Método para la elaboración de mapas representativos del pasado hidrobiológico de aguas oceánicas usando imágenes de la serie NOAA a partir de filtros pasa-alta

A. Iglesias, J. M. Cotos, J. A. Triñanes y C. Hernández

*Departamento Electrónica y Computación, Universidad de Santiago. 15706 Santiago de Compostela*

## RESUMEN

La periodicidad de los satélites NOAA, así como su gran cobertura espacial, han hecho que, durante los últimos años, se hayan convertido en una herramienta imprescindible para la gestión y explotación de los recursos naturales principalmente en el ámbito oceánico. Por otro lado, la renovación y profesionalización de la actividad pesquera, conlleva la utilización de nuevas tecnologías, entre las que destaca la teledetección. En este trabajo presentamos una comparación entre dos algoritmos detectores de bordes, el DoG y el CSED, que utilizaremos para localizar frentes térmicos, de gran interés en pesquerías pelágicas. A partir de estos datos, y con una sucesión de imágenes de días precedentes, estaremos en disposición de elaborar mapas que indiquen zonas donde exista una alta probabilidad de incrementar los rendimientos pesqueros. Completamos el trabajo comparando una imagen del sensor SeaWiFS con datos de clorofila con imágenes NOAA del mismo día.

**PALABRAS CLAVE:** Frentes térmicos, clorofila.

## ABSTRACT

NOAA satellites are being used as a powerful tool in management and exploitation of natural resources for last years. New technologies like remote sensing have contributed to renovate and professionalize various high impact economic sectors. In this way, fisheries are one of most affected sectors by this process. In this paper we present a comparison between two edge detectors, DoG and CSED, that we apply to locate thermal fronts and associated pelagic fisheries. With the information of the thermal fronts location, we can create productivity maps, like we explain in the paper. Also we proceed to compare the chlorophyll information of a SeaWiFS image with SST NOAA images from the same day.

**KEY WORDS:** Thermal fronts, chlorophyll.

## INTRODUCCIÓN

La teledetección es una potente herramienta para optimizar la gestión de los recursos naturales y su explotación. Un ejemplo de esto lo constituye el sistema operacional de pesquerías pelágicas del Laboratorio de Sistemas de la USC.

El objetivo de este trabajo es la implementación de un método para automatizar el procesado de imágenes y la detección de zonas con una alta concentración de fito y zooplancton, lo cual nos indicará que la cadena alimenticia está teniendo lugar. Esto ocurre por ejemplo allí donde hay frentes térmicos ya que es en esta zona donde tiene lugar una aparición de fito y zooplancton asociado al fuerte gradiente térmico. Con este fin crearemos mapas indicativos de zonas ricas en nutrientes en base a la intensidad del frente (variación de grados de temperatura por unidad de distancia, i.e. °C/milla) y la distancia temporal entre su aparición o nacimiento y su fecha de estudio. Este último parámetro estaría directamente ligado al tiempo necesario para que los nitratos y fosfatos pasen

de sales a materia orgánica en la cadena alimenticia.

Las imágenes con las que vamos a trabajar se obtienen a partir de los datos de NOAA-14, con el sensor AVHRR, en concreto de la zona de Madagascar en el Océano Índico.

A partir de ellos se pueden discriminar las partes que son de tierra y nubes de aquellas de interés.

## METODOLOGIA

### Máscara de nubes

En una imagen de satélite recibida hay datos de temperaturas de mar y de nubes juntos. Es importante su separación para quedarnos con los verdaderamente importantes, los de mar. Ello lo haremos estableciendo unos umbrales en los canales de la siguiente forma:

En el procesado hemos desechado todos aquellos puntos cuyo ángulo de inclinación de satélite con respecto a la vertical exceden los 50°.

Si la imagen es de día eliminamos todos los valores mayores que un cierto máximo del canal 2 (2, valor de albedo).

Si la imagen es de noche tenemos en cuenta la diferencia de emisividades de zonas de mar y nubes en el canal 3, calculando la diferencia de temperaturas de brillo de los canales 3 y 4.

Eliminamos todos aquellos píxeles que tengan un valor muy distante de los circundantes por tratarse de nubes de subresolución.

### Detección de bordes

Para alcanzar el objetivo expuesto se hace necesario el uso de un filtro pasa-alta que realce las altas frecuencias y por tanto las variaciones bruscas de temperatura. De esta forma crearemos una nueva imagen que elimine toda uniformidad para centrarnos en lo que nos interesa. Hemos estudiado dos clases de filtros pasa-alta, el Dod (Difference of Gaussian) y el CSED (Cluster-Shade Edge Detection).

a) El filtro DoG se basa en los operadores binomiales discretos (Jähane, 1995) con los que se pueden construir operadores pasabanda. Los filtros binomiales son una clase de filtros que provocan un "suavizado" de la imagen. Estos operadores son un excelente ejemplo de cómo filtros más complejos se pueden conseguir de componentes más simples. La máscara más simple y elemental de suavizado que se pueda pensar para el caso unidimensional es:

$$B_x = 1/2 [1 \ 1]$$

que calcula la media de valores de niveles de gris de la imagen de dos píxeles vecinos. Podemos usar esta máscara m veces en una fila de la misma imagen. Esto corresponde al filtro de la máscara:

$$[11]*[11]*\dots*[11]$$

O escrito como una ecuación de operadores:

$$B_x^m = B_x \cdot B_x \cdot \dots \cdot B_x$$

Algunos ejemplos de máscaras resultantes son:

$$B_x^2 = 1/4 [1 \ 2 \ 1]$$

$$B_x^3 = 1/8 [1 \ 3 \ 3 \ 1]$$

$$B_x^4 = 1/16 [1 \ 4 \ 6 \ 4 \ 1]$$

$$B_x^8 = 1/256 [1 \ 8 \ 28 \ 56 \ 70 \ 56 \ 28 \ 8 \ 1]$$

Estos filtros podemos usarlos para suprimir el ruido gaussiano, pero a costa de eliminar pequeños detalles. Como estos operadores convergen rápidamente en la función gaussiana, podemos utilizar esta función para describir filtros más complejos

(Wells, 1996). Usando la máscara de convolución continua:

$$1 / \sigma \sqrt{2/\pi} \exp(-x/2\sigma^2)$$

y la función de transferencia (k es el número de onda, ya que estamos trabajando en el dominio de las frecuencias):

$$\exp(-k^2\sigma^2/2)$$

se puede alcanzar la función de transferencia del filtro DoG:

$$DoG = \exp\left(\frac{-k^2\sigma_1^2}{2}\right) \left(1 - \exp\left(\frac{-k^2(\sigma_2^2 - \sigma_1^2)}{2}\right)\right)$$

siendo  $\sigma$ ,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  parámetros característicos de la curva gaussiana con la que estemos trabajando. El comportamiento de esta función es muy similar al de un suavizador muy ligero de bordes con el filtro gaussiano, al que posteriormente se le aplica un operador diferencial que realza las altas frecuencias, por lo que en realidad estamos creando un filtro pasa-banda.

b) El algoritmo Cluster-Shade Edge Detection (Holyer and Peckinpaugh, 1989) está basado en la matriz de concurrencia de niveles de gris (matriz GLC), como aparece debidamente explicado en la referencia de Cotos et al. (1993). Esta matriz puede usarse de la siguiente forma para resolver nuestro problema de detección de bordes:

$$S(\Delta x, \Delta y) = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} (i+j-\mu_i - \mu_j)^3 * P(i, j | \Delta x, \Delta y)$$

donde  $P(i, j | \Delta x, \Delta y)$  es el elemento correspondiente a la fila i, columna j de la matriz GLC. Podemos simplificar esta ecuación haciendo  $\Delta x = \Delta y = 0$  sin empeorar los resultados finales, con lo cual llegamos a:

$$S(\Delta x, \Delta y) = \frac{8}{M*N} \sum_{i=0}^{L-1} (i-\mu)^3 H(i)$$

Una vez implementado el algoritmo es necesario aplicarlo solamente a la zona de interés, es decir (hay que conseguir que no aparezcan como frentes las líneas de costa ni las nubes. Para lograr esto se utilizó una variable máscara mediante la cual detectamos con un filtrado pasa-alta las zonas que corresponden a la línea de costa y frontera de nubes y zonas de temperaturas. Los puntos restantes serán los correspondientes a frentes térmicos, siendo fácilmente localizables por tener un valor Cluster-Shade nulo o muy próximo a cero.

## Conocimiento heurístico añadido

Asimismo, se implementaron varias funciones con el objetivo de eliminar ruido en la imagen de frentes de la siguiente manera:

Suprimiendo todos aquellos puntos cuyo valor baje de un umbral en el caso del filtro DoG o aquellos que sean mayores que un cierto umbral mínimo en el caso del filtro CSED. Se supone que son pequeñas variaciones sin importancia.

Suprimiendo aquellos puntos (en teoría frentes) que estén aislados, pues buscamos aquellos gradientes lo más conexos y continuos posibles.

Comprobando que los puntos que parecen válidos lo son de verdad calculando la diferencia de temperaturas en la imagen.

## Método de elaboración de mapas representativos del pasado hidrobiológico de aguas oceánicas

### Madurez de aguas

Como paso siguiente en el procesado de las imágenes intentaremos combinar la información obtenida mediante los filtros anteriormente explicados con datos sobre la intensidad del frente localizado y el tiempo que lleve presente en la zona. Estos dos últimos parámetros están relacionados con el tiempo necesario para que los nitratos y fosfatos se conviertan de sales a materia orgánica dentro de la cadena alimenticia.

Como resultado de estos factores llegamos al concepto de madurez de aguas: número que nos da la medida en que los nitratos y fosfatos se han transformado en fito y zooplancton que alimente a especies superiores.

Esta información es interesante por dos factores de naturaleza bien distinta:

- Factor biológico: el fuerte gradiente térmico existente hace que los túnidos puedan termorregular la temperatura corporal con un gasto energético mínimo por su parte sin más que cruzar de una zona a otra. Estos peces no pueden parar de nadar debido a su alta densidad corporal, y a que, en general, tienen la vejiga natatoria atrofiada. El movimiento continuo hace que el animal genere una cantidad de calor que provoca que necesite enfriarse periódicamente. Ello puede arreglarse descendiendo en busca de la termoclina (profundidad a la cual el perfil vertical de temperaturas desciende bruscamente) lo que le obligaría a dejar de comer, o moviéndose hacia aguas más frías, que supondría bajo coste energético si el animal se encuentra en una zona de frentes.

- El origen de los frentes térmicos se encuentra, en mar abierto, generalmente, en el choque de dos corrientes de distinta naturaleza hidrodinámica (velocidad, temperatura y densidad) o en las surgencias de aguas procedentes del fondo en zonas costeras de afloramiento. En ambos casos encon-

tramos gran cantidad de nutrientes en torno a esa barrera térmica que se forma. Estos nutrientes, en presencia de la luz solar que irradia las capas superficiales desencadenan el proceso de producción primaria, al que le sigue el de producción secundaria, lugar de la cadena trófica en que entran en juego los túnidos.

Además de esto, es factible predecir que en cuanto los nutrientes se acaben, las especies asociadas migrarán en busca de más alimento. Si en una zona en la que el pez está alimentándose aparecen nuevos nutrientes, la cadena trófica no se interrumpe y la probabilidad de que el pez se mantenga en un entorno circundante aumentará.

### Generación de mapas de madurez

A partir de imágenes filtradas se calculan los "mapas de madurez", en los que dividiremos las zonas de interés (marítimas sin nubes) en cuadrantes a los cuales se les asigna un número que es función de la intensidad del frente, dato que se obtiene directamente de la imagen de gradientes y del tiempo que haya permanecido en ese cuadrante (Figura 1).

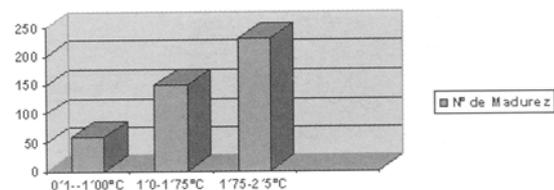


Figura 1. Valores de los números de madurez sin tener en cuenta el tiempo que lleven presentes en la zona

Pero también queremos tener en cuenta el número de días que lleve el frente presente en la zona, con el objetivo de averiguar si ha transcurrido el tiempo necesario para que se realicen los distintos pesos de la cadena alimenticia. Para ello multiplicaremos estos pesos por la siguiente función, teniendo en cuenta imágenes anteriores de la zona en la que estamos trabajando:

$$f(x) = e^{(0.15+0.31x-0.007x^2)}$$

siendo x la máxima diferencia de días entre las dos imágenes si hay frente en ellas (Figura 2).

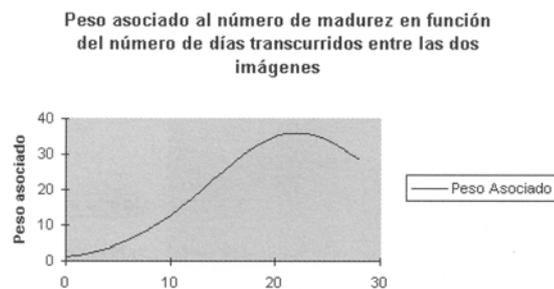


Figura 2. Gráfica de la función que pondera los números de madurez

Hemos elegido una gráfica cuya tendencia sea decreciente a partir del día 20, pues suponemos que a partir de entonces todos los nitratos y fosfatos se transformaron en fito y zooplancton, mientras que hasta ese día es creciente pues se entiende que se están transformando. Dicho con otras palabras, el índice de madurez es bajo pues no ha transcurrido el tiempo necesario para que "arranque" el proceso de producción de materia primaria. Los coeficientes se escogieron efectuando una regresión exponencial de unos valores que se adaptaban a la forma que pretendíamos obtener.

## RESULTADOS

### Máscara de nubes

Como ejemplo de la realización de una máscara de nubes, en la Figura 3 podemos observar una imagen SST, en la que las zonas negras entre valores de temperatura (niveles de gris) han sido considerados nubosos.

### Comparación de los filtros DoG y CSED

Vamos a analizar los resultados de pasar los dos tipos de filtros pasa-alta a la misma imagen sst (sea surface temperature), obtenida mediante métodos SplitWindow.

Hemos escogido esta imagen (Figura 3) por la claridad con la que se puede apreciar el fuerte frente térmico existente al norte de la isla.

Una vez implementados los dos tipos de filtros, se observan unos resultados más nítidos en el caso del filtro CSED que el del DoG, todo ello a costa de un mayor tiempo de trabajo computacional. En una imagen típica de 400x500 píxeles el DoG tarda alrededor de 1 min., mientras que el CSED cerca de 30 min. (trabajamos en una estación Sun SPARC 20).

La diferencia puede apreciarse en las Figuras 4 y 5, donde se observa cómo el frente antes mencionado se distingue de manera mucho más nítida en

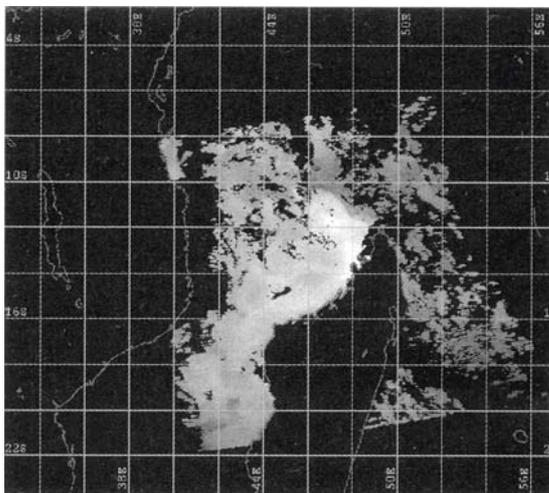


Figura 3. Imagen de temperaturas obtenida a partir del método Split-Window

el Cluster-Shade que en la imagen del DoG. Los demás frentes tienen un comportamiento similar, por ejemplo en los que están situados más al sur se aprecia un ruido difícilmente eliminable, mientras que en el caso del CSED los frentes aparecen

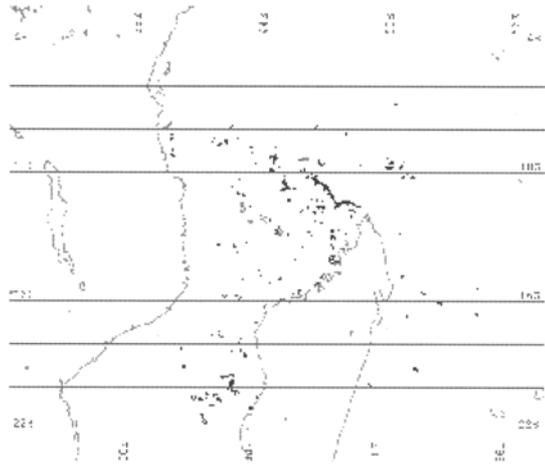


Figura 4. Resultado de aplicar el filtro Cluster-Shade Edge Detection (CSED) a la Figura 3

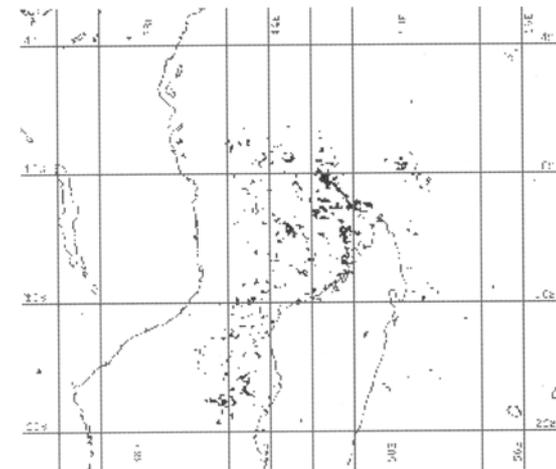


Figura 5. Resultado de aplicar el filtro DoG a la Figura 3

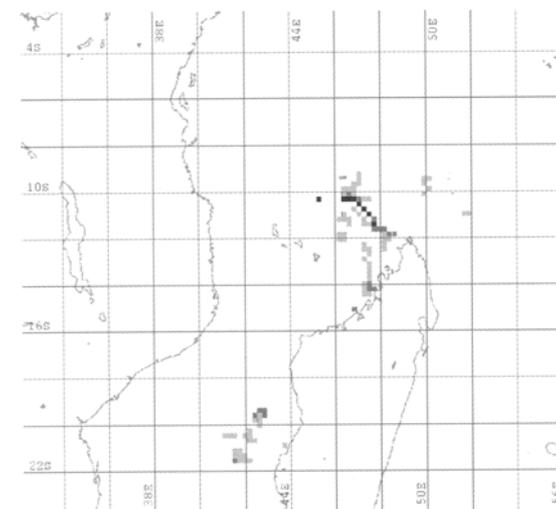


Figura 6. Mapa de madurez obtenido de la Figura 3 usando la imagen de la figura

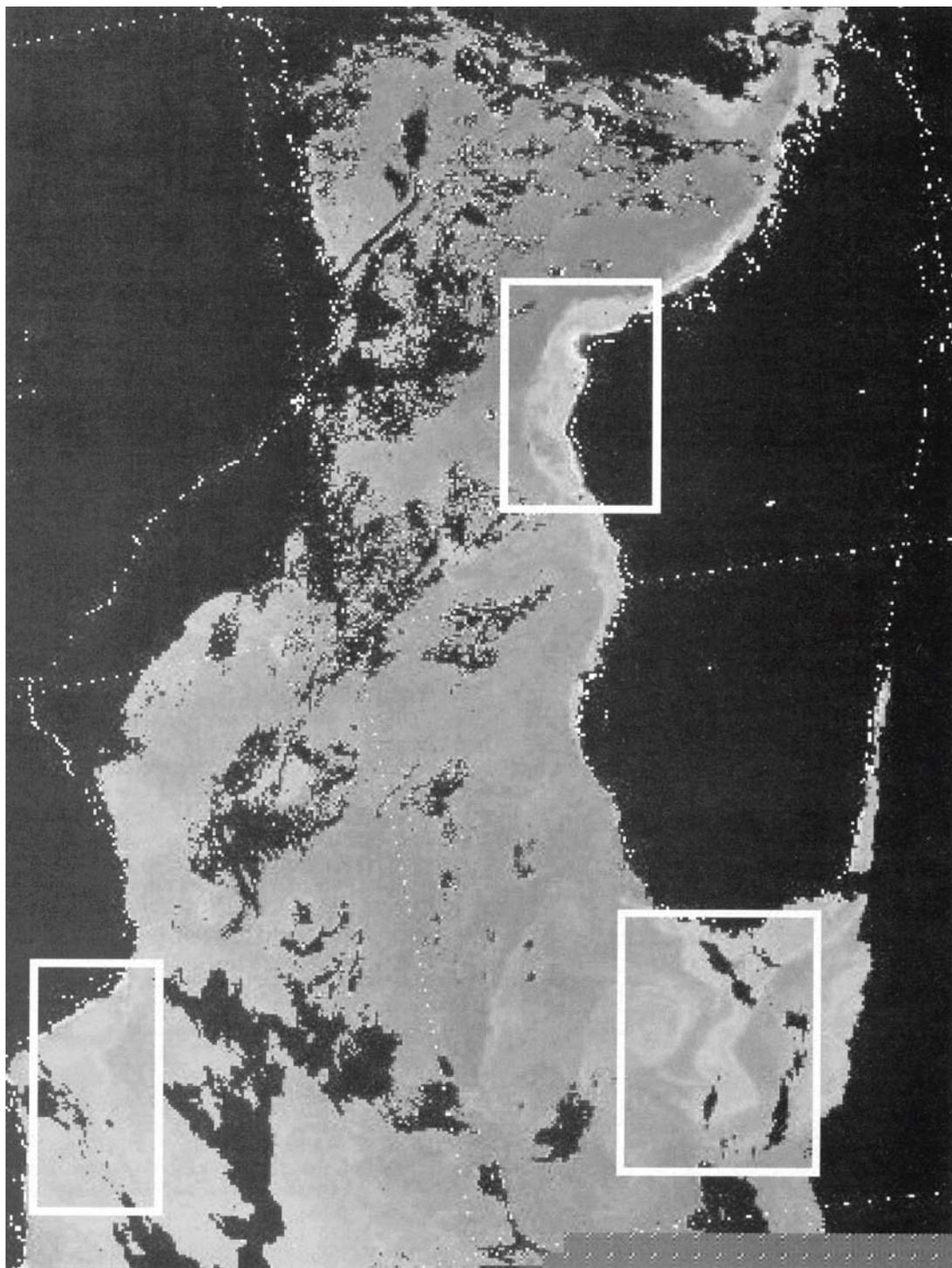


Figura 7. Imagen del sensor SeaWiifs correspondiente al 6 de octubre del Canal de Madagascar. Aparecen marcadas aquellas zonas de más alto contenido clorofílico

marcados lo suficiente como para apreciarse bien. Podría decirse que el ahorro de tiempo tiene como consecuencia un aumento del ruido en la imagen final. Los resultados son aceptables en los dos casos y para que fueran más fácilmente comparables habría que implementar al final de la rutina del filtro DoG un algoritmo detector de cruces por cero, con lo que ahora el filtro sería un LoG (Laplacian of Gaussian) (Chen, Huertas and Medioni, 1997; Crowley and Stem, 1984).

### Mapas de madurez

Hemos aplicado el algoritmo que crea los mapas de madurez usando como imagen de frentes la conseguida por el filtro DoG. También podríamos haber calculado el mapa después de haber pasado un filtro CSED, pero se obtendrían resultados similares. Ante el ahorro temporal que esto supone hemos optado por emplear el DoG. Los resultados

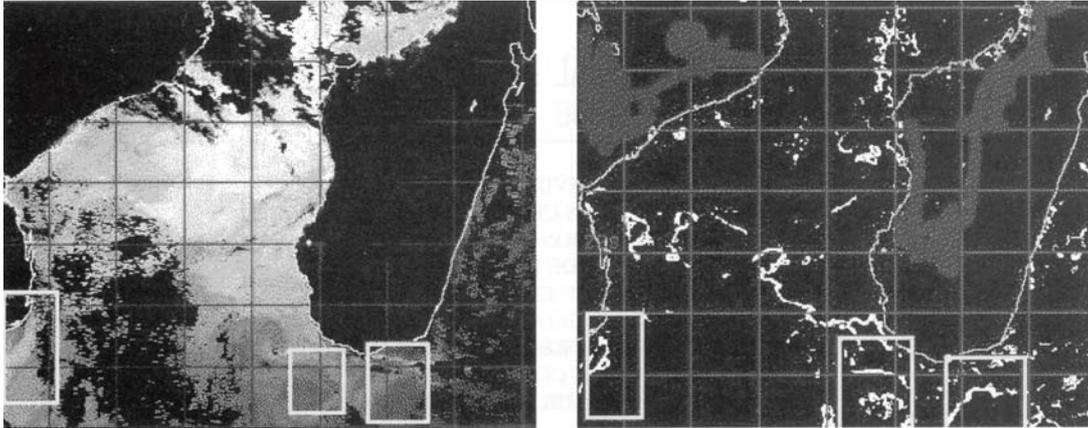


Figura 8. Imagen NOAA del mismo día que la del SeaWifs a las 23:32. En recuadros aparecen las zonas más resaltadas en la de SeaWifs

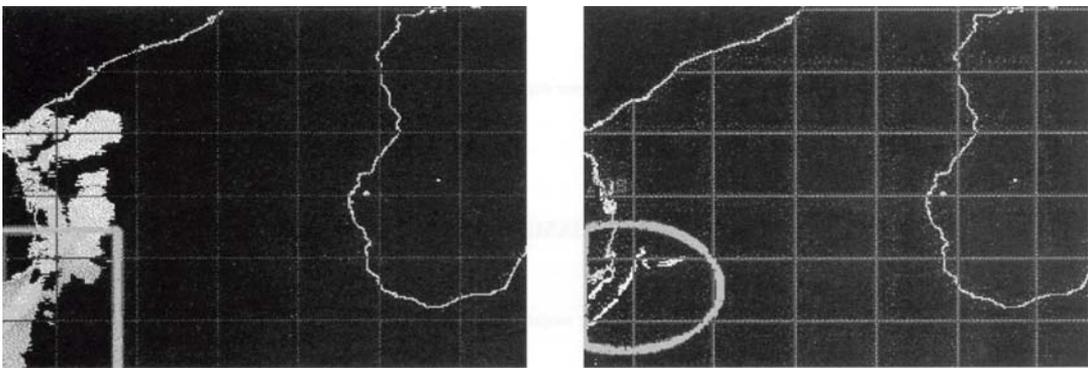


Figura 9. Imagen NOAA del mismo día que la del SeaWifs a las 06:03. En recuadros aparecen las zonas más resaltadas en la de SeaWifs

finales de lo que sería todo el procesado se muestran en la Figura 6.

Las zonas susceptibles de estudio son aquellas en las que existe un gradiente importante de temperaturas como al norte de Madagascar y en la parte sur. Con colores más claros se indica que la variación de temperatura (ponderada con el tiempo que lleve presente el frente) es mayor, con lo cual aumenta la probabilidad de la existencia de un banco pesquero según la teoría expuesta anteriormente.

El resultado puede considerarse satisfactorio, ya que las zonas donde existe una mayor homogeneidad de temperaturas no aparecen marcadas, mientras que las que sí lo están tienen una correspondencia correcta con la intensidad de los pulsos y la variabilidad temporal observada en la zona.

## VALIDACION

Una forma de validar los resultados la tendremos cuando recibamos una importante cantidad de imágenes del SeaWifs que nos den información sobre el contenido en clorofila de la superficie del mar, para poder comparar estos resultados con los obtenidos hasta ahora. Un estudio preliminar comparativo realizado recientemente en el Laboratorio de Sistemas avala lo anteriormente expuesto, sirviendo como muestra la siguiente imagen recibida

del Seastar (Figura 7), comparada con una imagen NOAA del mismo día y zona (Figura 8 y siguientes).

Como se puede apreciar aquellas zonas de más alto contenido clorofílico aparecen en imágenes NOAA como frentes casi permanentes

## BIBLIOGRAFIA

- CHEN, J. S., HUERTA, S. A. and MEDIONI, G. 1987. Fast Convolution with Laplacian-of-Gaussian Masks. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* 9 (4): 584-590.
- COTOS J. M., TOBAR A., HERNANDEZ C. y ARIAS J. E. 1993. MSED. Una alternativa a la detección de bordes. Una aplicación práctica: extracción de isotermas. *Revista de Teledetección*. 1: 9-13.
- CROWLEY J. L. and STERN R. M. 1984. Fast Computation of the Difference of Low-Pass Transform. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* 9 (2): 212-222.
- HOLYER R. J. and PECKINPAUGH S. H. 1989. Edge Detection Applied to Satellite Imagery of the Oceans. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 27 (1).
- JAHNE B. 1995. *Digital Image Processing*. SpringerVerlag. pp. 153-156.
- WELLS W. M. 1986. Efficient Synthesis of Gaussian Filters by Cascaded Uniform Filters. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 9 (2): 234-239.