

Evolución temporal de las estructuras de clorofila superficial observadas en el área de Cabo Blanco (Mauritania) a través del análisis de imágenes de color del océano

L. García Weil, A. Tejera Cruz, M. Cantón Garbín

Departamento de Física
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

L. Nykjaer

Institute for Remote Sensing Applications
Joint Research Centre. Ispra. Italia

RESUMEN

Tres series temporales de imágenes registradas por el sensor Coastal Zone Color Scanner (CZCS) durante diciembre de 1983, marzo de 1984 y octubre de 1984, han sido utilizadas para estudiar la tasa de decorrelación de las estructuras superficiales de pigmento fitoplanctónico. El área estudiada está comprendida entre 18°N y 23°N, y abarca aguas de la plataforma continental y de océano abierto. La tasa de decorrelación es obtenida a través del cálculo de la coherencia para distintas longitudes de onda para cada par de imágenes consecutivas. Estos resultados son analizados y discutidos.

ABSTRACT

Three temporal series of images obtained with the Coastal Zone Color Scanner sensor (CZCS) during December 1983, March 1984 and October 1984, have been used in order to study the decorrelation time of the surface phytoplankton patterns. The area of interest is placed between 18°N and 23°N and includes coastal and offshore oceanic regions. The decorrelation time is obtained through the computation of the squared coherence for selected wavelengths between consecutive images. These results are analyzed and discussed.

Introducción

Existe una extensa variedad de escalas espaciales y temporales para los procesos físicos-biológicos observados en los océanos. A través de las imágenes de satélite obtenidas con los sensores Coastal Zone Colour Scanner (CZCS) y Advance Very High Resolution Radiometer (AVHRR) es posible obtener mapas de distribución bidimensionales de forma cuasi-sinóptica de parámetros geofísicos oceanográficos, que abarcan un amplio rango de escalas, que van desde 1 a 10³ km. Ahora bien, esta capacidad de los satélites ha sido infrutilizada, debido a la ausencia de estudios cuantitativos o estadísticos que pongan de relieve la variabilidad a mesoescala presente en las imágenes de satélite.

Este estudio tiene como objetivo analizar la evolución temporal de las estructuras de clorofila observadas en tres series de imágenes del sensor CZCS (Coastal Zone Color Scanner) en el área de Cabo Blanco (Mauritania). Este área ha sido escogida por diversos motivos. En primer lugar, constituye una región donde las condiciones necesarias para la presencia de afloramiento costero son favorables a lo largo del año. También en esta latitud, la Corriente de Canarias se despega de la pendiente continental y fluye hacia el Sudoeste constituyendo parte del Giro Subtropical. Esto da como resultado que la advección hacia mar adentro de agua de la plataforma, rica en fitoplancton y posiblemente en nitratos, forme una gran pluma de pigmento (Gabric et al., 1993), que ha sido identificada a través del análisis de imágenes CZCS y que es conocida como el filamento gigante de Cabo Blanco (Van Camp et al., 1991) (ver figura 1). Por último, una detallada observación del archivo de quick-looks del CZCS existente en Maspalomas reveló que el número mayor de imágenes no contaminadas por nubes correspondía al área seleccionada.

Para analizar la evolución temporal, a partir de una secuencia de imágenes CZCS calculamos la tasa de decorrelación en función del tiempo de separación de estas imágenes. Ahora bien, en vez de calcular la función de correlación entre imágenes $r^2(0, \tau)$ para una separación espacial nula y una separación temporal τ , como en principio podría ocurrirnos, y que estaría dominada por las tendencias a gran escala, hemos adoptado el método utilizado por Denman y Abbott (1988), que analizaron una secuencia de imágenes CZCS para el área cercana a la isla de Vancouver, que al igual que la región de Cabo Blanco, se encuentra englobada dentro de un sistema de corrientes de límite oriental, en este caso el sistema de corrientes de California.

Denman y Abbott (1988) para cada par de imágenes separadas por un tiempo t , calcularon un análogo a $r^2(0, t)$, pero dependiente de la escala espacial k conocido como la coherencia cuadrada, que es una función de la inversa de la longitud de onda escalar. Esto les permitió conocer para su área de estudio el tiempo de decorrelación de las estructuras presentes en relación con su escala espacial.

Datos usados y metodología

Los datos utilizados, han sido 17 imágenes CZCS repartidas en tres períodos temporales distintos como se indica en la tabla 1.

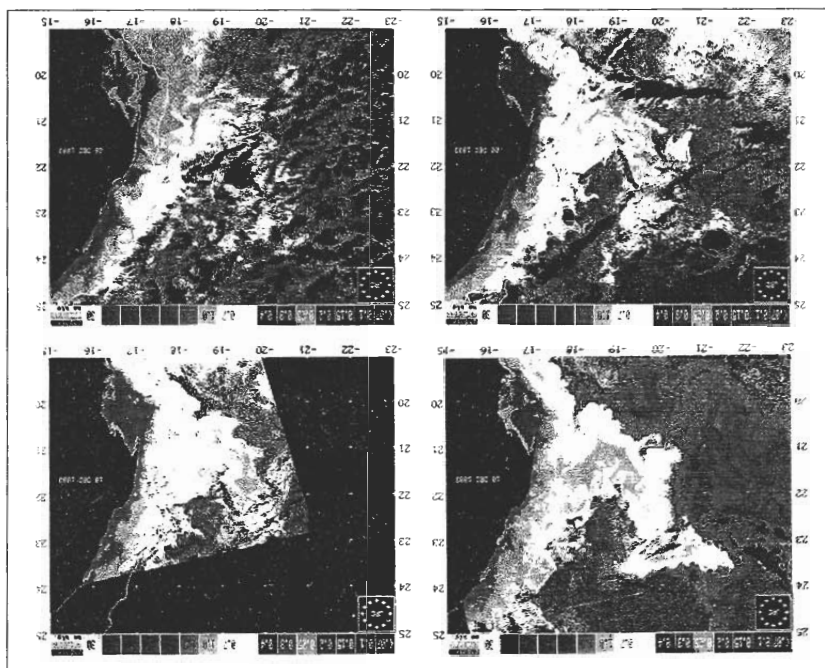


FIGURA 1
Imágenes CZCS correspondientes a la serie 1 de diciembre de 1983,
utilizadas en este estudio. (A. 64)

SERIE 1		SERIE 2		SERIE 3	
Órbita	Fecha	Órbita	Fecha	Órbita	Fecha
25891	10 dic. 1983	27204	14 mar. 1984	30176	15 oct. 1984
26015	19 dic. 1983	27218	15 mar. 1984	30190	16 oct. 1984
26029	20 dic. 1983	27232	16 mar. 1984	30259	21 oct. 1984
26098	25 dic. 1983	27273	19 mar. 1984	30273	22 oct. 1984
26112	26 dic. 1983	27287	20 mar. 1984	30342	27 oct. 1984
		27301	21 mar. 1984		
		27356	25 mar. 1984		

Tabla 1
Imágenes CZCS utilizadas en este estudio

Todos los datos de satélite fueron corregidos atmosféricamente utilizando la aproximación desarrollada por André y Morel (1991), que está basado en el uso de un modelo de reflectancia válido para aguas del caso 1, como se denomina a aquellas cuyas propiedades ópticas vienen determinadas principalmente por el fitoplancton. Para aguas del caso 2, que serían aquellas con altos contenidos de materia particulada en suspensión, este método no es válido. La concentración de pigmento de tipo clorofílico fue calculada utilizando los algoritmos desarrollados también por André y Morel (1991), que son,

$$\log C_{\text{sat}} = 0.347 - \log r_{13} + 2.14 (\log r_{13})^2 - 2.04 (\log r_{13})^3 \quad C_{\text{sat}} < 2 \text{ mg m}^{-3} \quad (1)$$

$$\log C_{\text{sat}} = 0.661 - \log r_{23} + 8.48 (\log r_{23})^2 - 88.38 (\log r_{23})^3 \quad C_{\text{sat}} > 2 \text{ mg m}^{-3} \quad (2)$$

donde r_{ij} es la razón entre las reflectancias difusas de las bandas i y j del CZCS, y C_{sat} es la concentración de pigmento en miligramos de clorofila por metro cúbico. La concordancia entre medidas de clorofila in-situ y las predicciones usando estos algoritmos son del orden del ± 30 -50%. Una característica común a todas las series de imágenes de Cabo Blanco es el alto contenido de pigmento incluso en aguas que se extienden más allá de la plataforma continental, lo cual se debe a las especiales características del área ya comentadas en la introducción (ver figura 1).

Posteriormente, las imágenes de pigmento fueron corregidas geoméricamente usando los datos de efemérides del satélite y representadas en proyección Mercator. Para mejorar esta corrección geométrica, aplicamos una transformación polinómica a la imagen corregida geoméricamente, utilizando puntos de control terrestre, deducidos a través de la equiparación de la línea de costa de la imagen con datos cartográficos de referencia. Con este procedimiento se logra una exactitud de 1 ó 2 pixels en el posicionamiento final de la imagen. El tamaño final elegido para todas las imágenes después de este proceso fue de 512x512 pixels, donde cada pixel tiene 1,1 km. de lado. Esto lo hicimos así para que nuestros resultados fueran intercomparables con aquellos obtenidos por Denman y Abbott (1988).

Seguidamente para el cálculo de la tasa de decorrelación, el siguiente paso fue la aplicación a todas las imágenes de un filtro 3 x 3 de media móvil, para eliminar el ruido presente previo al análisis, y los valores fuera de rango que corresponden a la tierra y las nubes fueron fijados a cero.

Ya que en todas las imágenes CZCS, incluso las aquí seleccionadas, hay siempre una fracción que corresponde a nubes, el análisis subsiguiente no fue aplicado a la totalidad de la imagen, sino a subáreas oceánicas claras comunes a algunas de las imá-

genes de cada serie. Para facilitar el análisis, las subáreas elegidas fueron cuadradas y tenían los siguientes tamaños 100x100 km. y 150x150 km. respectivamente. Algunas de las subáreas elegidas se encuentran presentes en la figura 2 y un sumario de éstas viene descrito en la Tabla 2.

	NORTE	SUR
Costera	1,3,4,12,4',1"	2,6,7,8,6'
Oceánica	5,1',2',3',5',2"	9,10,11,3"

Tabla 2
Subáreas elegidas para el cálculo de la tasa de decorrelación



FIGURA 2
Imagen CZCS correspondiente al 14 de marzo de 1984, donde aparecen sobrepuestas algunas de las subáreas seleccionadas

Como se observa podemos distinguir cuatro categorías a las que se corresponden las subáreas elegidas. Esto ha sido hecho para comprobar si existe alguna relación entre la tasa de decorrelación y la división del área de estudio efectuada.

Entonces, para continuar con el análisis todos los valores fuera de un subárea seleccionada fueron fijados a cero (esto se conoce como un filtro boxcar), y la media dentro del subárea calculada y sustraída a los valores de campo dentro del subárea. Además, ya que para calcular la coherencia, realizamos el análisis espectral para la imagen completa, aplicamos un taper de coseno a los residuos con un 10% de taper en cada extremo del subárea, primero en la dirección este-oeste y luego en la dirección norte-sur.

Para calcular la coherencia es necesario obtener el autoespectro y el espectro cruzado de cada par de imágenes. El autoespectro para cada par de imágenes, $S_{11}(k)$ y $S_{22}(k)$ fue calculado utilizando también la transformada rápida de Fourier bidimensional. Después, el autoespectro unidimensional fue formado mediante la suma azimutal dentro de anillos circulares de magnitud radial constante. Por otro lado, el espectro cruzado complejo $s_{12}(\mathbf{k})$ también es calculado utilizando la transformada rápida de Fourier bidimensional, de modo que $s_{12}(\mathbf{k}) = c_{12}(\mathbf{k}) - iq_{12}(\mathbf{k})$, donde $c_{12}(\mathbf{k})$ y $q_{12}(\mathbf{k})$ son el coespectro y el espectro de cuadratura. Estos fueron también sumados azimutalmente para dar lugar al coespectro unidimensional $C_{12}(k)$ y el espectro de cuadratura unidimensional $Q_{12}(k)$, y entonces realizamos el cálculo de la coherencia cuadrada

$$\gamma_{12}^2(\kappa) = \frac{C_{12}^2(\kappa) + Q_{12}^2(\kappa)}{S_{11}(\kappa)S_{22}(\kappa)} \quad (3)$$

Como ya ha sido comentado, la coherencia cuadrada entre dos imágenes, es para un número de onda determinado, análoga al coeficiente de correlación entre dos imágenes calculado a partir de la varianza y covarianza, tomadas para un desplazamiento espacial nulo:

$$r_{12}^2(0) = \frac{\sigma_{12}^2(\tau)}{\sigma_{11}(0)\sigma_{22}(0)} \quad (4)$$

Ahora bien, el coeficiente de correlación cruzada representa la correlación entre dos imágenes sobre la totalidad del subárea y depende principalmente de la correlación entre las escalas más grandes dentro del subárea.

Por último, representamos la coherencia cuadrada para diferentes bandas con intervalos de número de onda (o longitud de onda) $\Delta\kappa$ frente al tiempo de separación entre pares de imágenes, τ , obteniendo un cálculo de la evolución temporal a la que las estructuras de pigmento evolucionan y se decorrelacionan.

Ya que la coherencia cuadrada es, al igual que el coeficiente de correlación, un estadístico, es necesario establecer los niveles de significancia correspondientes. Nosotros hemos adoptado los niveles de significancia utilizados por Denman y Abbott (1988) ya que nuestro estudio es similar al suyo. Ellos obtuvieron estos niveles de significancia mediante el cálculo de la coherencia cuadrada entre muchos pares de imágenes aleatorias sintéticas no correlacionadas con la forma espectral apropiada.

Resultados

Para cada una de las tres series de imágenes, hemos representado el valor de la coherencia cuadrada en función del tiempo de separación, para distintos intervalos de longitud de onda, y para las distintas subáreas. Los intervalos de longitud de onda correspondientes van desde 50-100 km., 25-50 km. y 12.5-25 km. respectivamente.

Para la serie 1 y para la longitud de onda mayor (ver figura 3), esto es, 50 a 100 km. (o desde $0.01-0.02 \text{ km}^{-1}$) se observa que la tendencia general es que todas las subáreas pierden la coherencia después de un promedio de 5 días, a excepción del subárea 3 que la retiene significativamente después de este intervalo. Para longitudes de onda que van desde 25 a 50 km ($=0.02-0.04 \text{ km}^{-1}$) (ver figura 3) la coherencia para todas las subáreas disminuye, y aunque los niveles de significancia son también menores, todas las subáreas pierden la significancia para intervalos de tiempo menores. Así las subáreas 1, 2, 6 y 8 pierden la coherencia después de 5, 2, 2 y 1 día respectivamente, cuando lo hacían después de 6, 4, 2 y 4 días para longitudes de onda de 50 a 100 km. El resto de las subáreas han perdido la coherencia después de un día. Como se observa, el subárea 3, como en el caso anterior, retiene la coherencia después de 5 días para esta longitud de onda. Por último, para el intervalo de longitud de ondas menores, esto es, aquellas que van desde 12.5 a 25 km ($=0.04-0.08 \text{ km}^{-1}$) (ver figura 3), todas las subáreas han perdido la coherencia después de un día, a excepción del subárea 3 que se mantiene aún sobre el límite después de 5 días.

Para la serie 2 y para las longitudes de onda que van desde 50 a 100 km (ver figura 4), el promedio para el cual las distintas subáreas pierden la coherencia es de 3 días. En concreto, para las subáreas 1, 2, 3, 4, y 7, la coherencia es perdida después de 2, 3, 3-4, 3 y 4-5 días respectivamente. Se observa además que la coherencia del subárea 5 se mantiene por debajo del nivel de significancia aunque muy cerca de éste, mientras que las subáreas 6 y 8 son totalmente incoherentes para cualquier separación temporal. Para las longitudes de onda que van desde 25 a 50 km (ver figura 4), los valores de la coherencia dejan de ser significativos para intervalos de tiempo más cortos. Así las subáreas 3, 4 y 7 pierden la coherencia después de 3, 1 y 2 días respectivamente. El resto de las subáreas después de un día son incoherentes. Y por último para las longitudes de onda que van desde 12.5 a 25 km (ver figura 4) todas las

subáreas pierden la coherencia después de un día a excepción de la subárea 3 que la retiene hasta después de 2-3 días.

Para la serie 3 solamente disponemos de dos subáreas (ver figura 5), y para éstas, para las longitudes de onda que van desde 50 a 100 km, la coherencia se pierde después de 2-3 y 4-5 días. Del mismo modo para las longitudes de onda que van desde 25 a 50 km (ver figura 5) la coherencia deja de ser significativa después de 2-3 días, mientras que para las longitudes de onda menores, esto es, aquellas que van desde 12.5 a 25 km (ver figura 5), las subáreas pierden la coherencia después de 1 día.

Conclusiones y discusión

Podemos obtener las siguientes conclusiones del estudio de la coherencia realizado:

- 1.- En primer lugar observamos que la coherencia, en general, decrece de forma monótona para todas las series y para todas las longitudes de onda implicadas.
- 2.- Se observa además, como ocurría en el análisis llevado a cabo por Denman y Abbott (1988) en el Pacífico, que las estructuras de pigmento con menores escalas espaciales pierden la coherencia para intervalos de tiempo más cortos.
- 3.- Observamos que las estructuras de pigmento de las subáreas de la serie 2 de imágenes pierden la coherencia más rápidamente que aquellas de la serie 1 y serie 3. Quizás este hecho esté relacionado por los mecanismos físicos-biológicos predominantes en cada serie, que hacen que en las series 1 y 3 de imágenes se observe de manera clara la pluma de pigmento gigante antes mencionada, mientras que en la serie 2 aun cuando las concentraciones de pigmento son altas, la presencia de la pluma no es clara.
- 4.- No hemos detectado, en cambio, diferencias significativas entre la coherencia de las áreas costeras y de mar abierto para el área de Cabo Blanco, al contrario que les ocurría a Denman y Abbott para el área de Vancouver, donde observaron diferencias entre ambas, siendo la tasa de decorrelación menor para las áreas costeras que para aquellas de mar abierto. Esto quizás esté motivado por las especiales características de la región de Cabo Blanco ya mencionadas, que hacen que la distinción entre los regímenes costeros y de mar abierto no sea tan clara como para otras áreas oceanográficas de afloramientos.
- 5.- Además, para todas las escalas espaciales involucradas, los intervalos de tiempo para los cuales la coherencia se pierde en nuestra área, se asemejan a aquellos obtenidos por Denman y Abbott (1988) para el área costera de la región de la isla de Vancouver. Esto puede ser debido a la alta variabilidad de las estructuras de pigmento observadas en el área de Cabo Blanco tanto en las regiones costeras como de mar abierto.
- 6.- Es posible pensar que estos valores para la tasa de decorrelación son bajos, teniendo en cuenta por ejemplo las observaciones llevadas a cabo que muestran

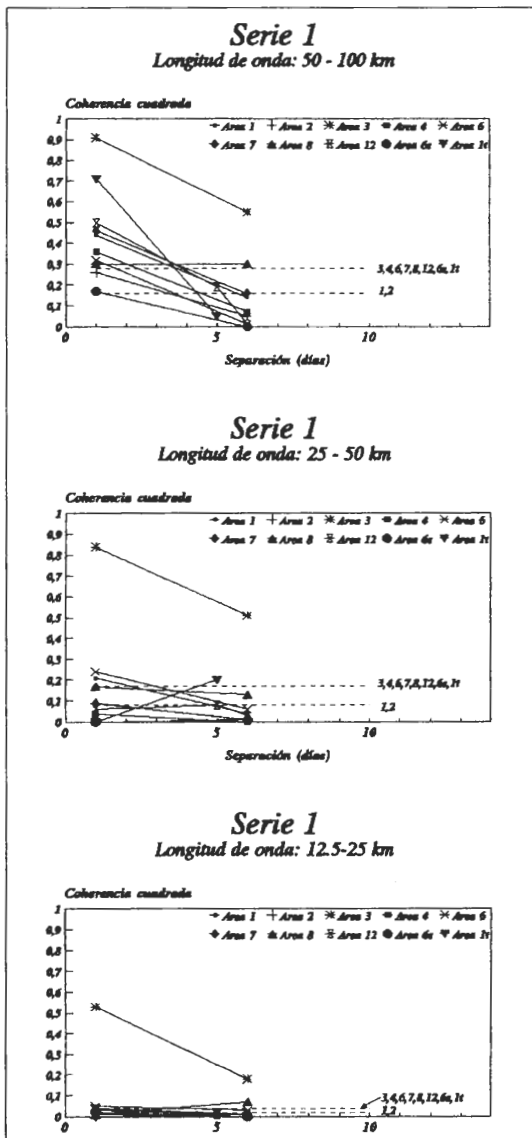


FIGURA 3

Coherencia cuadrada frente al tiempo para las imágenes CZCS de la serie correspondiente a diciembre 1983

la persistencia de remolinos y otras estructuras como filamentos más allá de los valores aquí indicados. Esto podría ser debido a que al análisis llevado a cabo es euleriano y que cualquier movimiento de traslación y/o rotación de las estructuras de pigmento será traducido en pérdida de coherencia. Por tanto, es necesario no confundir entre la tasa temporal de pérdida de coherencia y el tiempo de vida de una estructura para un intervalo de longitud de onda determinado. Es evidente que el intervalo de tiempo para el cual la coherencia deja de ser significativa constituye, en todo caso, un límite inferior del tiempo de vida de las estructuras.

- 7.- Además, el fitoplancton es un trazador no-conservativo, pudiendo generar varianza en las longitudes de onda aquí implicados. Por tanto, sería interesante por ejemplo llevar a cabo un análisis similar al mismo tiempo con imágenes de temperatura coincidentes para observar si los procesos biológicos son responsables de la formación de alguna estructura.
- 8.- Este estudio es bastante importante, ya que, por ejemplo, una práctica habitual en teledetección es, debido a los problemas que produce la presencia de nubes, el cálculo de imágenes compuestas y promedios espaciales y temporales. Entonces, debemos saber qué estructuras de fitoplancton son conservadas al realizar este tipo de promedios. Así, por ejemplo, si calculamos el promedio de todas las escenas disponibles en un mes para el área de Cabo Blanco es evidente que las estructuras de pigmento con escalas espaciales menores de 100 km no son preservadas en la imagen final.
- 9.- Por último, sería interesante extrapolar este estudio a otras áreas del afloramiento del NW de África, y comparar resultados. Es de esperar, por ejemplo, que en otras áreas del afloramiento menos dinámicas la coherencia sea perdida para intervalos mayores de tiempo y que existan diferencias entre la coherencia calculada para las áreas costeras y de mar abierto.

Bibliografía

- André, J.M. y Morel, A.:** 1991. Atmospheric corrections and interpretation of marine radiances in CZCS imagery, revisited. *Oceanol. Acta.* 14: 3-22.
- Denman, K.L. y Abbott, M.R.:** 1988. Time evolution of surface chlorophyll patterns from cross-spectrum analysis of satellite color images. *J. Geophys. Res.* 93: 6789-6978.
- Gabric, A.J. et al.:** 1993. Offshore export of shelf production in the Cape Blanc (Mauritania) Giant Filament as derived from Coastal Zone Color Scanner Imagery. *J. Geophys. Res.* 98: 4697-4712.
- Van Camp, L. et al.:** 1991. Upwelling and boundary circulation off Northwest Africa as depicted by infrared and visible satellite observations. *Progress in Oceanography* 26: 357-452.

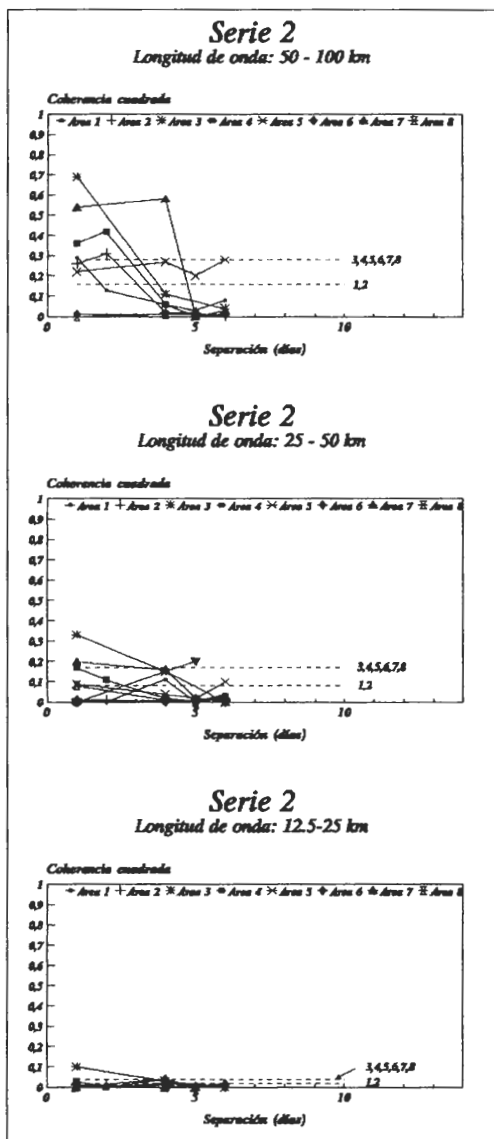


FIGURA 4

Coherencia cuadrada frente al tiempo para las imágenes CZCS de la serie correspondiente a marzo 1984

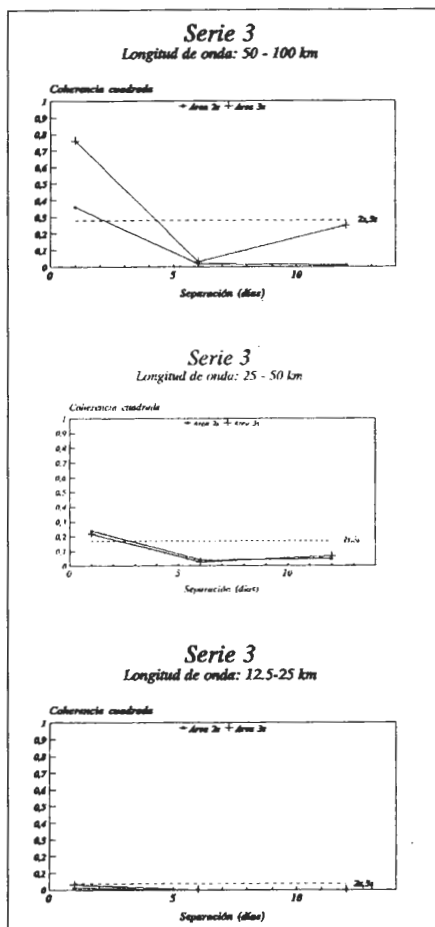


FIGURA 5
Coherencia cuadrada frente al tiempo para las imágenes CZCS de la serie correspondiente a octubre 1984