

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS



IDENTIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS DIPOLO CON ANOMALÍAS ESPACIALES
ESTANDARIZADAS DE IMAGENES SATELITALES DE LA CONCENTRACION
DE CLOROFILA y K_d (490)

TESIS QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS PARA
OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

PRESENTA

MIGUEL DIEGO GÓMEZ SÁNCHEZ

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO. OCTUBRE DE 2018

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
POSGRADO EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

**IDENTIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS DIPOLO CON ANOMALÍAS
ESPACIALES ESTANDARIZADAS DE IMÁGENES SATELITALES DE LA
CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA y K_d (490)**

QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA
OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA
PRESENTA

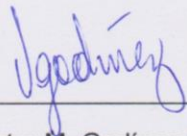
Miguel Diego Gómez Sánchez

Aprobada por:



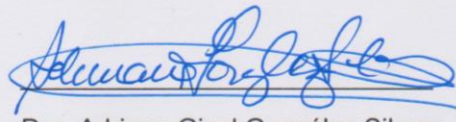
Dr. Eduardo Santamaría del Ángel

Director de tesis



Dr. Victor M. Godínez Sandoval

Sinodal



Dra. Adriana Gisel González Silvera

Sinodal

Resumen

Una estructura dipolo está conformada por un remolino ciclónico, uno anticiclónico, una gorra y un tallo. Los puede haber desde unos metros, hasta cientos de kilómetros. Los remolinos juegan un papel importante en el océano, debido a que son un importante mecanismo para remover, mezclar y transportar calor, sal y otros trazadores biogeoquímicos a través del mar. Se han reportado estructuras dipolo utilizando diferentes productos satelitales, como The Thematic Mapper, altimetría, anomalías del nivel del mar, temperatura superficial del mar y concentración de clorofila (*Chla*). No obstante, el tipo de datos empleados en las investigaciones previas posee algunas restricciones como la resolución, o la profundidad física de la que provienen; por ejemplo, los datos de temperatura superficial del mar provienen de 10 μm de profundidad, mientras que las imágenes de *Chla* provienen de la primera profundidad óptica (1°PO). Sin embargo, cada pixel de *Chla* pertenece a diferente profundidad óptica. Por ejemplo, un valor de 2 mg m^{-3} puede corresponder a 1°PO de 5 o de 10 m. Dado que la *Chla* es calculada a partir de un algoritmo que utiliza una función exponencial, si se combina con la física de los dipolos, en teoría, la parte ciclónica se observaría con más detalle que la anticiclónica en este tipo de imágenes. Por esta razón, en este trabajo, se planteó identificar y parametrizar estructuras dipolo de manera total o por componente, en dos áreas de estudio: las Islas Reina Charlotte, Canadá (caso 1) y el sur del Golfo de California (caso 2), mediante la corrección de la escala exponencial de los datos de *Chla* a través del cálculo de las anomalías espaciales estandarizadas (AEE) y la obtención de los valores de *Chla* a una misma profundidad mediante una relación entre la *Chla* y la 1°PO (*Chla-sup*). Para el primer caso, se analizaron los pases de MODIS/Aqua SeaWiFS y MODIS/Aqua, de cuatro días de diferentes años, pero sólo se encontraron dipolos en el día 04-09-2002, donde se identificaron dos estructuras dipolo, con una velocidad horizontal de 3.06 Km h^{-1} y 1.01 Km h^{-1} , respectivamente. La orientación del primero fue hacia el noreste y la del segundo hacia el suroeste. Para el caso dos, se hicieron compuestas diarias de MODIS/Terra, SeaWiFS, MODIS/Aqua y VIIRS, del mes de julio del 2010, pero sólo se encontró una estructura dipolo en el periodo del 11 al 12 de julio y se parametrizó el remolino ciclónico, con una velocidad horizontal de 4.5 Km d^{-1} y una orientación hacia el noreste. El utilizar AEE de *Chla* y *Chla-sup*, permitió identificar dipolos de manera total o por componentes, siempre y cuando, no existieran nubes y hubiese sol. Las AEE no afectan la integridad espacial de los datos de *Chla*. La descripción y parametrización de las estructuras dipolos presentadas, constituye una buena aproximación, que, combinada con otras metodologías, puede arrojar resultados más exactos.

Palabras clave: Estructuras dipolo, Anomalías espaciales estandarizadas, imágenes de *Chla*, imágenes de K_d (490)

DEDICATORIA

A mi mamá y papá por estar siempre conmigo y apoyarme en todo

A mi hermano, César, por ser mi mejor amigo y enseñarme el mundo al revés

A mi hermana, Adriana, por ser mi mejor amiga y siempre sonreír conmigo

A mi abuela por cuidarme desde su cielo

A Shiva y Daksha por llegar a mi vida.

...y a tu sonrisa, sí, a tu sonrisa.

Agradecimientos

Agradezco a mi comité de tesis, el Dr. Eduardo Santamaria del Ángel, la Dra. Adriana González Silvera y el Dr. Victor Godínez por compartirme su conocimiento, ideas y tiempo durante la realización de esta tesis.

Al Dr. Rafael Hernández Walls por su tiempo e ideas

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haberme otorgado la beca No. 326545 y así poder haber desarrollado mi maestría en la Facultad de Ciencias Marinas. A la Universidad Autónoma de Baja California por haberme aceptado en el programa de Oceanografía Costera.

Contenido

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	5
---------------------------------------	----------

1.1. Hipótesis	5
1.2. Objetivos	5
1.2.1 Objetivo general.....	5
1.2.2 Objetivos particulares	5
CAPITULO 2. METODOLOGÍA	5
2.1. Área de estudio.....	5
2.2. Datos.....	7
2.3. Primera profundidad óptica (1°PO) a través de $K_d(490)$	8
2.4. Clorofila superficial en la primera profundidad óptica.....	9
2.5. Anomalías espaciales estandarizadas	10
2.6. Extracción y parametrización del contorno	10
CAPÍTULO 3. RESULTADOS	11
3.1. Estructuras dipolo en las Islas Rreina Charlotte.....	13
Descripción del dipolo 1	17
Descripción del dipolo 2	20
3.2. Estructura dipolo en sur del Golfo de California	23
CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN	28
CONCLUSIONES	34
REFERENCIAS.....	35

Lista de tablas

Tabla I. Información sobre los datos utilizados en este trabajo.....	8
Tabla II. Funciones de Matlab utilizadas en la parametrización de contornos	11

Tabla III. Parámetros de la estructura dipolo 1 de las Islas Reina Charlotte.....	19
Tabla IV. Parámetros de la estructura dipolo 2 de las Islas Reina Charlotte	23
Tabla V. Parámetros del remolino ciclónico del sur del Golfo de California	24

Lista de Figuras

Figura 1. Regiones de estudio.	7
Figura 2. Diagrama de flujo de los pasos a seguir para la identificación de un dipolo tomando como base las AEE de Chla superficial.	12
Figura 3. Diferentes variables que corresponden al sensor MODIS/Terra.	14
Figura 4. Diferentes variables que corresponden al sensor SeaWiFS.	15
Figura 5. Diferentes variables que corresponden al sensor MODIS/Aqua	16
Figura 6. AEE de Chla-sup del dipolo 1	17
Figura 7. Perfiles diagonales en el dipolo 2	18
Figura 8. Desplazamiento del dipolo 1 en las Islas Reina Charlotte.....	18
Figura 9. AEE de la Chla-sup del dipolo 2.....	20
Figura 10. Perfiles del dipolo 1 para los sensores MODIS/Terra, SeaWiFS, MODIS/Aqua.	21
Figura 11. Desplazamiento del dipolo 2.	22
Figura 12. Imágenes del día 11 de julio del 2010	25
Figura 13. Imágenes del día 12 de julio del 2010	26
Figura 14. Perfiles diagonales en el dipolo del sur del Golfo de California.	27
Figura 15. Contorno del remolino ciclónico del sur del Golfo de California.	27
Figura 16. Comportamiento de los datos de Chla	28

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

Desde el lanzamiento de los satélites para la observación del océano, las imágenes de teledetección han proporcionado vistas sinópticas de estructuras oceánicas de grandes áreas que no estaban disponibles con muestreos *in situ* (Isern-Fontanet *et al.*, 2002). Dentro de los diferentes fenómenos oceánicos que pueden ser detectados por imágenes de color del océano están los frentes (Santamaria-del-Ángel *et al.*, 2002), giros y remolinos (Castellani, 2005; Karoui *et al.*, 2010).

Un remolino se puede definir como una desviación en el flujo de estado estable de un fluido, causando vorticidad (Faghmous *et al.*, 2014). Los hay desde unos pocos metros, hasta cientos de kilómetros; este trabajo se enfocará en las estructuras de mesoescala, de 25-250 Km en escala espacial y un tiempo de vida de días a meses (Faghmous *et al.*, 2015). Una de sus principales clasificaciones se da por su sentido de rotación. En el hemisferio norte, los remolinos ciclónicos se caracterizan por ser anomalías negativas en el nivel del mar, causando que el agua aledaña tenga una dirección hacia el centro del remolino, en sentido contrario al gradiente de presión. Debido al efecto Coriolis, el agua que se desplaza hacia el centro del remolino es desviada a la derecha, causando un giro con dirección contraria a las manecillas del reloj (Rhines, 2001; Huerta-Escamilla, 2013), que en la dimensión vertical, genera una divergencia de masas y provoca un ascenso en las isotermas e isopichnas, generando un núcleo frío (Merino *et al.*, 2004) y rico en concentración de clorofila (Chla) (Mcgillicuddy *et al.*, 1998).

En los remolinos anticiclónicos, las anomalías del nivel del mar son positivas, provocando que el agua migre del centro del remolino hacia afuera, por lo que el efecto Coriolis genera que estas aguas se desvíen hacia la derecha con un giro de dirección a favor de las manecillas del reloj (Rhines, 2001; Huerta, 2013), provocando convergencia de masas. Se caracterizan por una elevación en la superficie parecida a un domo, una mayor temperatura en su centro que en su periferia y generalmente bajas concentraciones de Chla en su centro (Merino *et al.*, 2004).

Los remolinos de mesoescala juegan un papel importante en los procesos biogeoquímicos y físicos (Volkov *et al.*, 2012) al remover, mezclar y transportar calor, sal y otros trazadores biogeoquímicos a través del mar (Callendar *et al.*, 2011; Faghmous *et al.*, 2015). El flujo de nutrientes inducido por remolinos es considerado un importante constituyente en la producción primaria global, con una contribución de aproximadamente 20 % (Falkowski *et al.*, 1991). Dentro de los principales mecanismos de generación de remolinos están los causados por corrientes, inestabilidades baroclínicas, topografía, viento y cambios en la pendiente del fondo marino (Tawnya , 1997).

Existen métodos directos para estudiar remolinos de mesoescala, como los cruceros oceanográficos (Ruijter *et al.*, 2003) que proporcionan información valiosa, con la desventaja de que son costosos, y dificultan el seguimiento *in situ* de este tipo de estructuras. No obstante, con el avance tecnológico en los sistemas de percepción remota, se ha logrado obtener información de áreas grandes del océano en intervalos cortos de tiempo (Esquivel-Trava, 2004). En

particular, para estas estructuras se han desarrollado diferentes parámetros de detección que pueden ser aplicados a productos satelitales como, por ejemplo, el parámetro de Okubo-Weiss, empleado con altimetría satelital (Faghmous *et al.*, 2015; Chelton *et al.*, 2011).

Diferentes trabajos han reportado remolinos de mesoescala con productos satelitales como altimetría (Siegel *et al.*, 1998; Isern-Fontanet *et al.*, 2002; Chelton *et al.*, 2011; Morrow *et al.*, 2012; Kurczyn *et al.*, 2013; Cheng *et al.*, 2014; Faghmous *et al.*, 2015), temperatura superficial del mar (Castellani 2005; Karoui *et al.*, 2010), Chla (Hirawake *et al.*, 2003; González-Silvera *et al.*, 2004; Pegau *et al.*, 2002; Hong *et al.*, 2011; Sánchez-Velasco *et al.*, 2013) y el coeficiente de atenuación de la luz difusa ($K_d(490)$) (Marcello *et al.*, 2015). Similares a los remolinos, pero menos estudiadas, las estructuras dipolo están conformadas por un remolino ciclónico y uno anticiclónico, una “gorra” y un tallo que corresponde al chorro que fluye en la estructura (Tawnya, 1997; Apango-Figueroa *et al.*, 2015). La forma de hongo típica asociada con las estructuras dipolo representa fenómenos de mesoescala complejos y menos frecuentes que remolinos y frentes (Lavín *et al.*, 2009). Son importantes debido a que pueden generar hábitats de larvas de peces en su interior (Apango-Figueroa *et al.*, 2015) y actúan como mecanismos de mezcla (Ahlnas *et al.*, 1987).

De igual forma que los remolinos de mesoescala, también se han realizado estudios sobre las estructuras dipolo combinando cruceros oceanográficos y productos satelitales. Ruijter *et al.* (2003) estudiaron la formación de dipolos en el sur de Madagascar, con datos de altimetría. Ridderinkhof *et al.* (2013) utilizaron la

combinación de 18 años de altimetría, altura dinámica y velocidades geostróficas, en el sureste de Madagascar. Roberts *et al.* (2013) usaron datos de anomalías del nivel del mar en el canal de Mozambique. Hooker *et al.* (1995), estudiaron dipolos en el Atlántico Norte con datos de temperatura superficial del mar. He *et al.* (2015), utilizaron anomalías de compuestas de Chla, de los sensores MODIS/Aqua, MODIS/Terra y SeaWiFS en el Pacífico suroriental. En México, Apango-Figueroa *et al.* (2015) utilizaron imágenes del sensor MODIS/Aqua para reportar una estructura dipolo al sur del Golfo de California. Wang *et al.* (2006) empleando únicamente altimetría y vientos superficiales, analizaron el ciclo de vida de un dipolo formado al sur del mar de China.

Si bien, se han desarrollado múltiples metodologías y modelos matemáticos (Callendar *et al.*, 2011) con el objetivo de conocer las estructuras dipolo, la mayoría de los trabajos han utilizado datos de altimetría y poco se sabe sobre metodologías para imágenes de temperatura superficial y Chla en la identificación de dipolos, o su utilidad está restringida a sólo un componente de la estructura (Karoui *et al.*, 2010). Aunado a esto y a que en los trabajos previos no parametrizan las estructuras dipolo, en este trabajo se propone la identificación de este tipo de estructuras con imágenes de Chla y el coeficiente de atenuación de la luz difusa $K_d(490)$.

1.1. Hipótesis

- La totalidad de una estructura dipolo o alguno de sus componentes podrá ser identificado a partir de las anomalías espaciales estandarizadas de Chla y/o la concentración de Chla en el primero metro de profundidad (Chla-sup), siempre y cuando, su influencia sea dentro de la primera profundidad óptica.

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Identificar estructuras dipolo mediante las anomalías espaciales estandarizadas (AEE) de Chla y Chla-sup, en el sur del Golfo de California (México) e Islas Reina Charlotte (Canadá), en periodos de 1 mes y 4 días, respectivamente.

1.2.2 Objetivos particulares

- Analizar el comportamiento de las estructuras dipolo identificadas con las variables Chla, AEE de Chla, Chla-sup y AEE de Chla-sup.
- Determinar el área, perímetro, excentricidad, orientación, distancia horizontal recorrida y velocidad horizontal por una estructura dipolo.

CAPITULO 2: METODOLOGÍA

2.1. Área de estudio

Para la realización de este trabajo fueron considerados dos casos de estudio, cada uno perteneciente a una zona diferente: el sur del Golfo de California en México y las Islas Reina Charlotte en Columbia Británica, Canadá. Estas áreas fueron elegidas considerando los registros previos de las estructuras de interés. En el caso de las Islas Reina Charlotte, se tomaron en cuenta los dipolos reportados por Callendar *et al.* (2011), mientras que para los del sur del Golfo de California, se tomó el dipolo reportado por Apango-Figueroa *et al.* (2015).

Caso 1: Islas Reina Charlotte

Islas Reina Charlotte o Haida, es un archipiélago que consta de dos islas principales que se encuentran a 120 Km de la costa noroeste de Columbia Británica, Canadá, con profundidades de hasta 2000 m. Se caracteriza por ser una zona donde se forman remolinos anticiclónicos en invierno (Di Lorenzo *et al.*, 2005), generados al sur de 54.5 °N a lo largo de la costa de las islas, con diámetros de entre 150 y 300 Km (Tawnyya, 1997).

Caso 2: Sur del Golfo de California

El Golfo de California está localizado en el noroeste de México, entre los estados de Sonora y Sinaloa en el este y la península de Baja California en el oeste; hacia el sur, se comunica con el océano Pacífico. Dentro del GC coexisten fenómenos físicos de diferentes escalas espaciales y temporales (Castro *et al.*, 2000). Los vientos son estacionales: durante el invierno vienen del noroeste, con velocidades de 8–12 m s⁻¹, y durante el verano vienen del sureste, con ~5 m s⁻¹ (Douglas *et al.*, 1993). Se caracteriza por ser una zona donde se generan dipolos, meandros y

remolinos, debido a las diferencias entre densidad y temperatura (Lavín *et al.*, 2009)

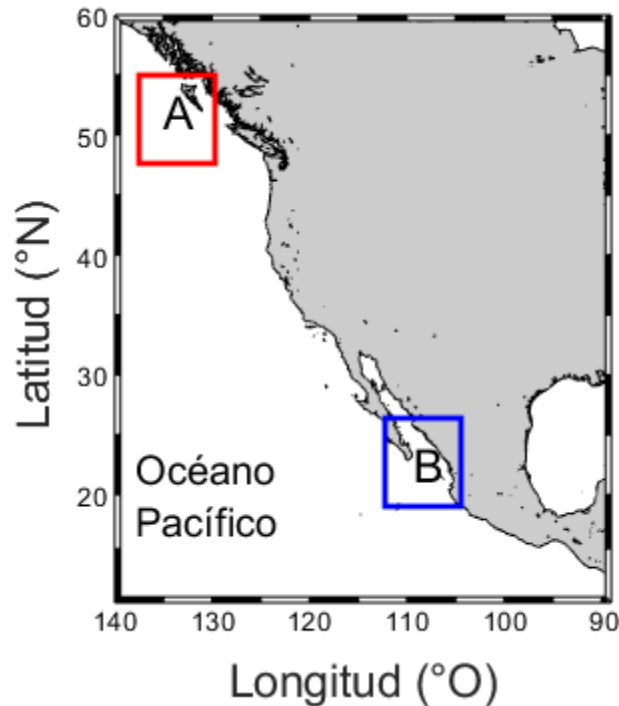


Figura 1. Regiones de estudio. El recuadro A pertenece a la región de las Islas Reina Charlotte, Canadá. La región B al sur del Golfo de California.

2.2. Datos

Se descargaron del portal de la nasa (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>) los pases MODIS/Terra , SeaWiFS, MODIS/Aqua y VIIRS, nivel L1b. Usando el programa SEADAS 7.1, se aplicaron los algoritmos OCx (OC3M-v4, OC4O-4v, OC3M-v4 y OC4Me-v4, para MODIS/Terra, SeaWiFS, MODIS/Aqua y VIIRS, respectivamente) y se pasaron a L2 (variables derivadas de datos geofísicos a una resolución n). Posterior a ello, se georeproyectaron a una proyección cilíndrica equidistante y se realizaron las compuestas diarias por sensor.

La Tabla I, muestra información sobre los productos utilizados en este trabajo. Para el sur del Golfo de California, se analizaron 30 imágenes compuestas. En las Islas Reina Charlotte se analizaron cuatro días de diferentes años (Tabla I).

Tabla I. Información sobre los datos utilizados en este trabajo.

Área de estudio	Autor	Sensor	Hora de pase	Periodo analizado	# imágenes analizadas
				04-09-2002;	9
Islas Charlotte	Callendar <i>et al.</i> , 2011	MODIS/Terra, SeaWiFS, MODIS/Aqua	10:30	09-01-2006;	9
			12:00	19-08-2006;	9
			13:00	07-09-2007	9
Golfo de california	Apango-Figueroa <i>et al.</i> , (2015)	MODIS/Terra, SeaWiFS, VIIRS MODIS/Aqua,	10:30	1-07-2010 a	120
			12:00	30-07-2010	
			13:00		

2.3. Primera profundidad óptica (1°PO) a través de $K_d(490)$

Kirk (2011) define la profundidad óptica como la disminución de irradiancia en un intervalo de profundidad dependiendo de las propiedades ópticas del agua. Se puede conocer el valor de la 1°PO a través del $k_d(490)$, el cual se calcula a partir de una relación empírica entre mediciones *in situ* de $k_d(490)$ y relaciones de la banda azul a la banda verde de reflectancia satelital (Nasa Ocean Color, 2018).

Con base en lo anterior, a cada imagen de $K_d(490)$ de los periodos analizados se le aplicó la Ec. 1 para obtener la 1°PO.

$$Ec. 1 \quad 1^{\circ} PO = \frac{1}{K_d(490)}$$

2.4. Clorofila superficial en la primera profundidad óptica

La concentración de Chla por sensores remotos, se calcula a partir de una relación empírica derivada de mediciones *in situ* de Chla y reflectancias satelitales, las cuales se obtienen con una función logarítmica entre las longitudes de onda de 440 a 700 nm (O'Reilly *et al.*, 1998; Darecki *et al.*, 2004). El cálculo de Chla también incluye dos algoritmos, el índice de color Hu y el O'Reilly Ocx (O'Reilly *et al.*, 1998). Este último es el algoritmo universal para el cálculo de Chla, el cual se basa en una función exponencial y logarítmica (O'Reilly *et al.*, 1998). Las imágenes de Chla provienen de una profundidad física mayor que la de temperatura superficial del mar. Sin embargo, cada pixel de Chla pertenece a diferente profundidad óptica (Kirk, 2011). Por ejemplo, un valor de 2 mgm⁻³ puede corresponder a una profundidad óptica de 5 m o de 10 m. Para corregir lo anterior, se estimó el valor de la primera profundidad óptica a partir del inverso del ($K_d(490)$) y se realizó un cociente entre la Chla y la 1°PO, denominado Chla-sup (Ec. 2), que representa la concentración de Chla en un metro. A partir de esta razón se realizó la identificación de estructuras dipolo.

$$Ec. 2 \quad Chla - sup = \frac{chla}{1^{\circ}PO}$$

2.5. Anomalías espaciales estandarizadas

Utilizando la Ec. 3, se estandarizó cada matriz de Chla y Chla-sup, generando mapas de isolíneas negativas y positivas, denominados contornos.

$$Ec. 3 \quad Z = \frac{x - \bar{x}}{SD}$$

Donde x representa el valor de cada pixel, \bar{x} es el promedio y SD la desviación estándar de toda la imagen.

2.6. Extracción y parametrización del contorno

El valor del contorno se eligió de acuerdo con el contorno que más semejara una forma circular (remolino ciclónico/anticiclónico) o de hongo, dependiendo el caso.

La extracción de contorno se realizó con la metodología de binarización de umbral, la cual asigna valores entre 0 y 1 a cada pixel y genera una nueva matriz binaria, donde 1 representa los bordes. De esta manera, los contornos pueden ser tratados como objetos y con la ayuda de las funciones contenidas en la Tabla II, se pueden obtener parámetros como área, perímetro, centro geométrico, orientación y excentricidad de cada contorno. Este último parámetro, tiene un intervalo entre 0 y 1, donde el valor de 0 corresponde a un círculo y 1 a una línea.

El cálculo de la velocidad horizontal se realizó con la Ec. 4, donde d es el desplazamiento del centro geométrico del contorno de cada pase y t el delta del tiempo entre pases y/o días.

$$Ec. 4 \quad v = \frac{d}{t}$$

Finalmente se trazó un perfil diagonal en el contorno de las estructuras para conocer su diámetro, así como el cambio de Chla y Chla-sup en función de la distancia.

Tabla II. Funciones de Matlab utilizadas en la parametrización de contornos

Funciones	Descripción
Imbinarize	Genera una matriz binaria a partir de una imagen de entrada "I" por el método de "thresholding"
bwconncomp	Conecta el componente de una imagen binaria
regionprops	Mide las propiedades de las regiones encontradas en la imagen binaria
bwboundaries	Traza los bordes en una imagen binaria

La figura 2 sintetiza la metodología de análisis empleada para cada producto satelital estudiado, desde la obtención de datos hasta la parametrización de borde de las estructuras dipolo.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS

En esta sección se muestra la descripción de las imágenes de Chla, K_d (490), anomalías espaciales estandarizadas de Chla, la Chla-sup, anomalías espaciales estandarizadas de Chla-sup y la 1°PO, de los sensores: MODIS/Terra, SeaWiFS, y MODIS/Aqua, así como la identificación y parametrización de las estructuras dipolo encontradas el 04-09-2002, debido a que en los otros tres días (Tabla I) no se encontraron estructuras dipolo.

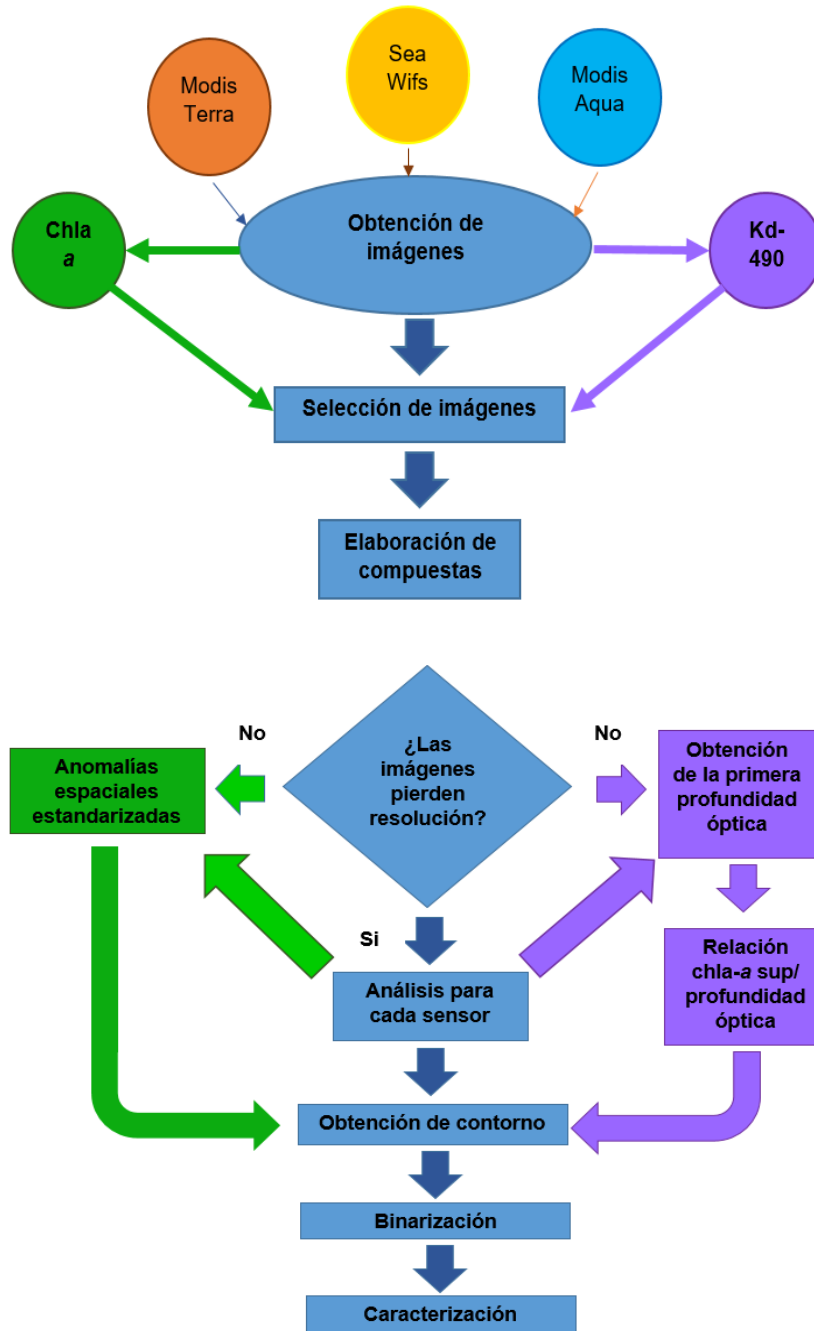


Figura 2. Diagrama de flujo de los pasos a seguir para la identificación de un dipolo tomando como base las AEE de Chl-a superficial.

Las variables mencionadas anteriormente se pueden observar desde la figura 3 hasta la figura 5. La sección (a) de estas figuras, representa la concentración de Chl-a, con valores que oscilan entre 0.5 a 4 mgm^3 . La sección (b) es el k_d (490),

con valores de 0.1 a 0.4. La sección (c), son las AEE de Chla, que van desde -1 a 2 desviaciones estándar. La sección (d) representa la cantidad de Chla presente en la primera profundidad óptica, con valores de 0.06 a 1 $\text{mgm}^{-3}\text{m}^{-1}$. La sección (e), las AEE de la Chla-sup y finalmente la sección (f), la primera profundidad óptica con valores de 1 hasta 30 metros.

3.1. Estructuras dipolo en las Islas Reina Charlotte

Inicialmente, se planteó trabajar en la identificación de estructuras dipolo de Charlotte, sobre imágenes compuestas, pero al calcularlas, perdían resolución debido a que algunas imágenes presentaban nubosidad, por lo que se propuso hacer el análisis por separado para cada sensor. Siguiendo la definición de Apango-Figueroa *et al.* (2015) sobre la forma y componentes de una estructura dipolo, en las Islas Reina Charlotte, se observaron tres dipolos, pero sólo se analizaron dos, debido a que el sensor MODIS/Terra presentaba nubes en la región donde se encontraba el tercero. En la figura 3a se muestran las dos estructuras dipolo captadas por el sensor MODIS/Terra. El dipolo uno se delimita por un recuadro rojo y el dipolo dos, por un recuadro blanco. A partir de la figura 3e se realizó la primera identificación para los dipolos, seguida de la figura 4e para el sensor SeaWiFS y figura 5e para el MODIS/Aqua.

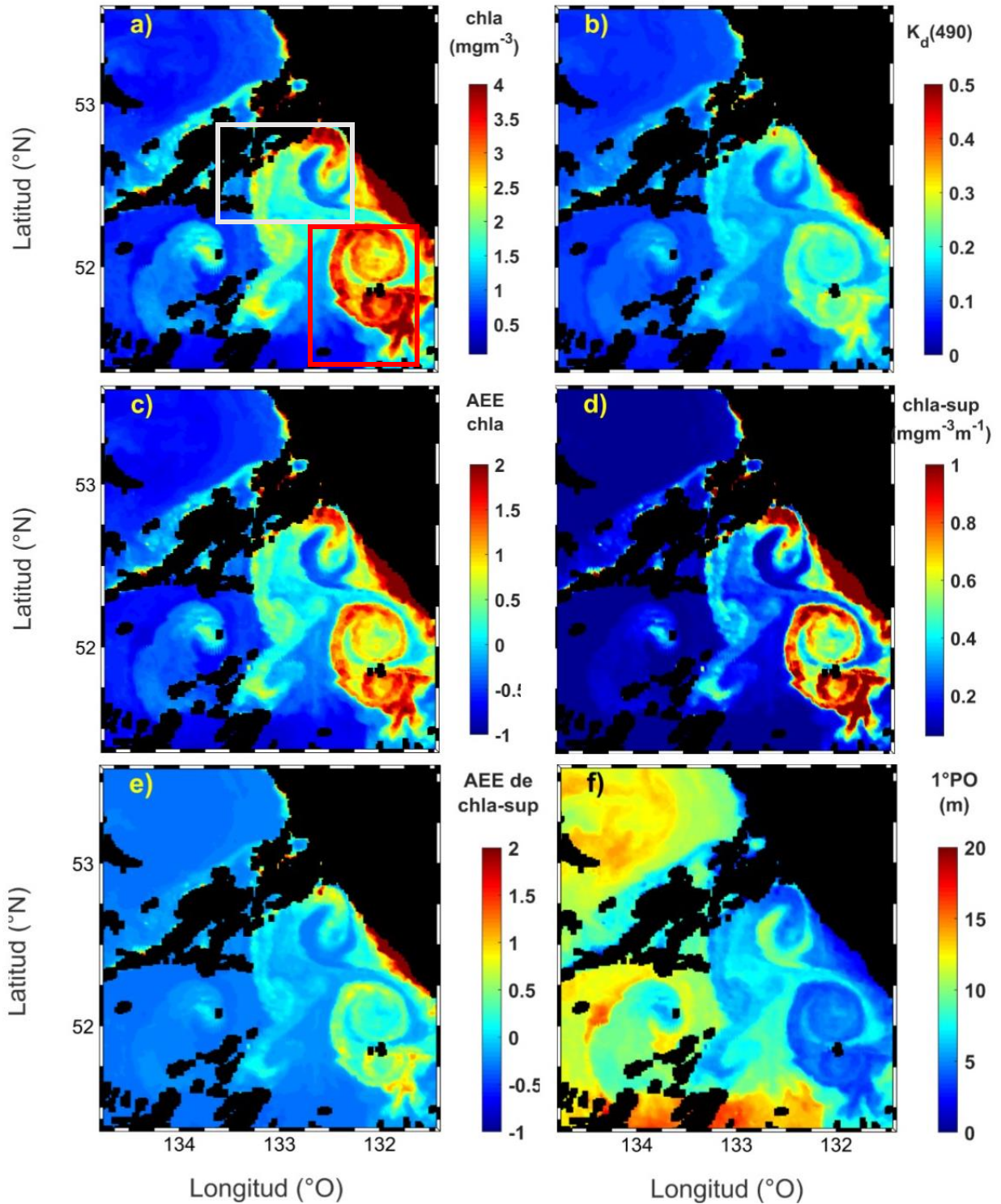


Figura 3. Diferentes variables que corresponden al sensor MODIS/Terra. **a)** corresponde a Chla: el rectángulo rojo pertenece al dipolo 1 y el rectángulo blanco al dipolo 2. **b)** $K_d(490)$, **c)** AEE de Chla, **d)** Chla-sup, **e)** AEE de Chla-sup y **f)** 1°PO.

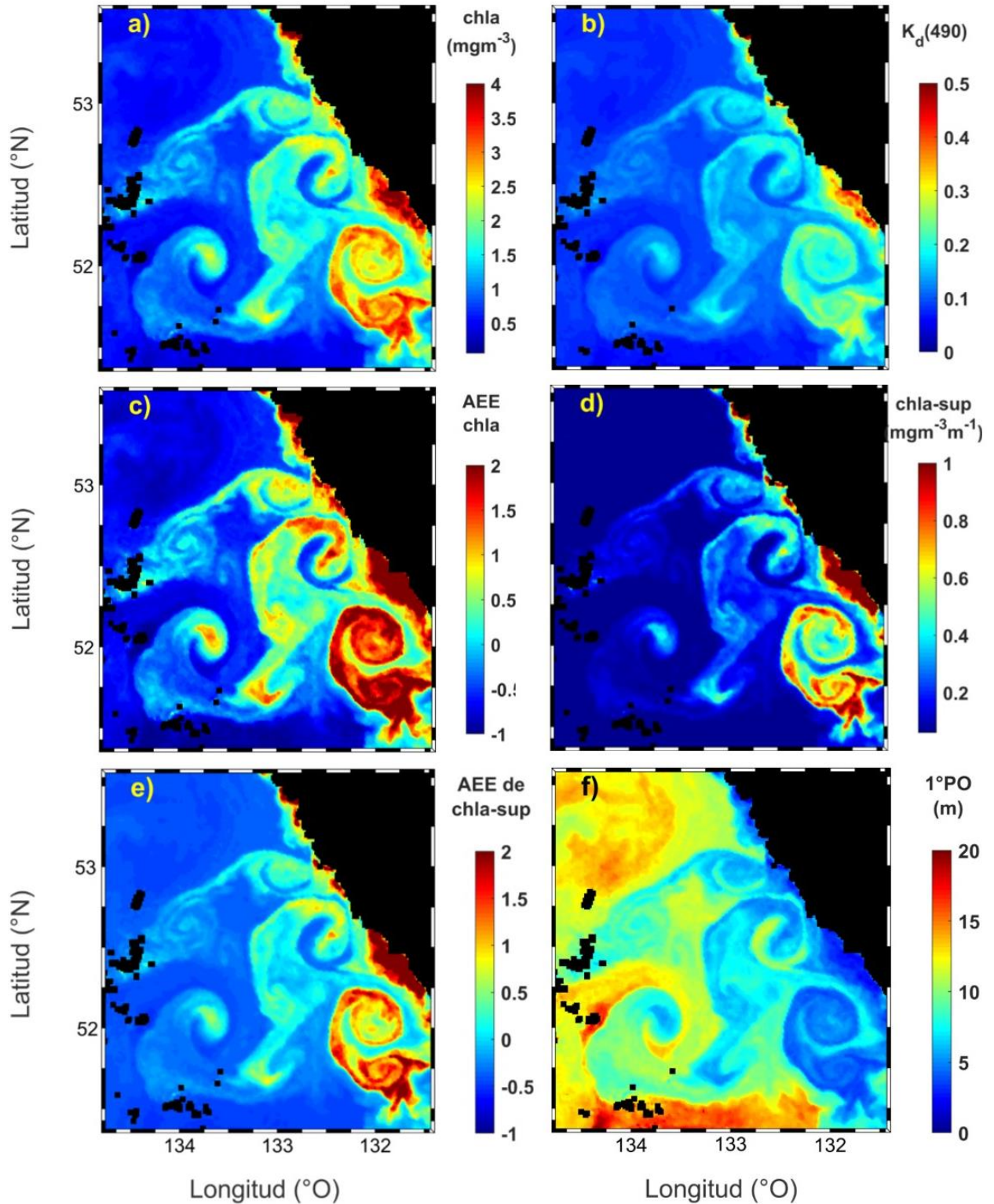


Figura 4. Diferentes variables que corresponden al sensor SeaWiFS. **a)** corresponde a Chla, **b)** $K_d(490)$, **c)** AEE de Chla, **d)** Chla-sup, **e)** AEE de Chla-sup y **f)** 1°PO .

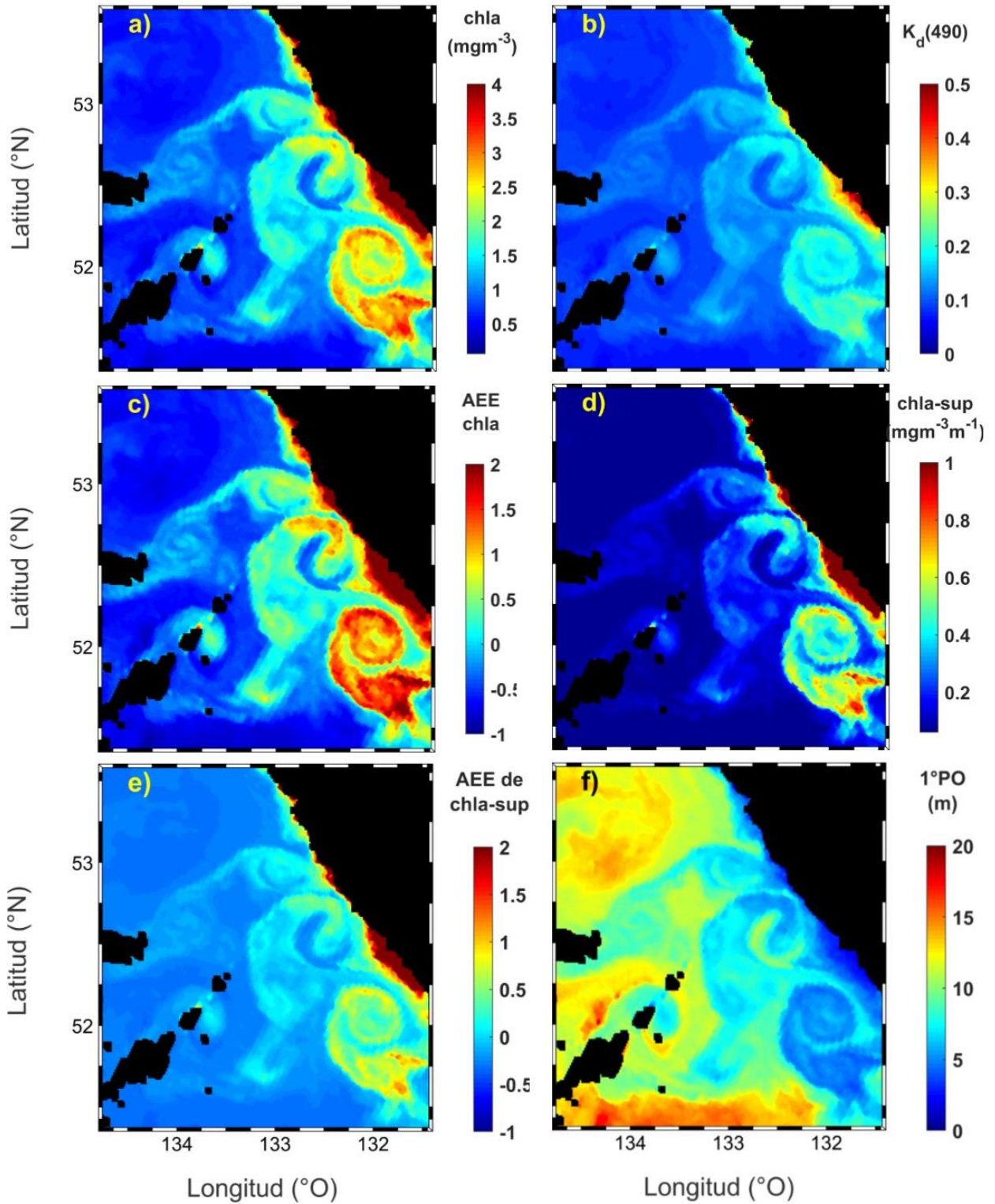


Figura 5. Diferentes variables que corresponden al sensor MODIS/Aqua. **a)** corresponde a Chl a, **b)** K_d (490), **c)** AEE de Chl a, **d)** Chl a-sup, **e)** AEE de Chl a-sup y **f)** 1°PO.

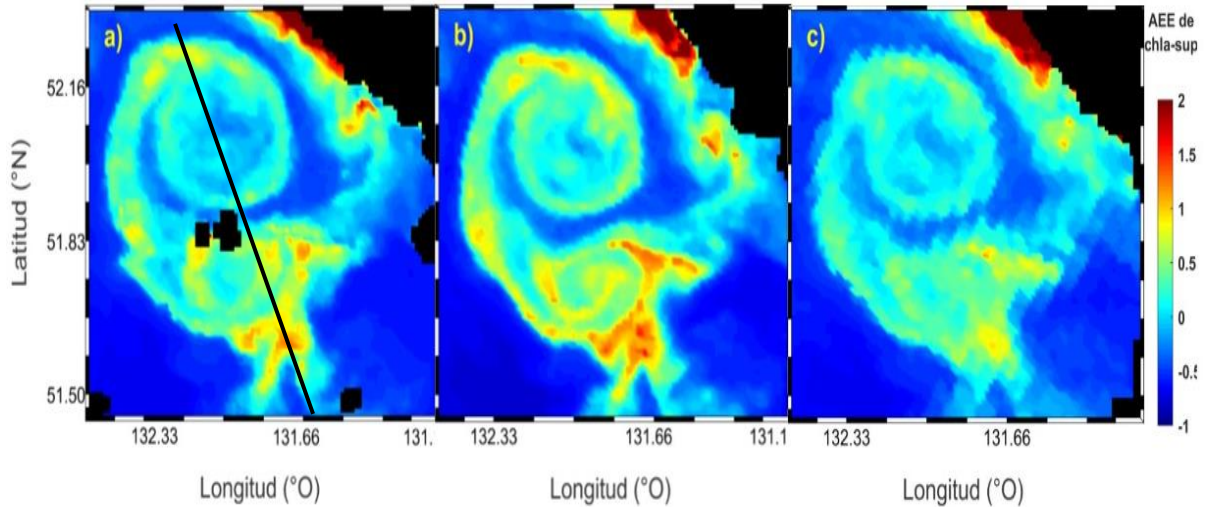


Figura 6. AEE de Chla-sup del dipolo 1. a) pase MODIS/Terra, b) pase SeaWiFS y c) pase de MODIS/Aqua. La línea negra es el transecto diagonal.

Descripción del dipolo 1

El dipolo 1 está delimitado entre los 134.75 a 133.75 ° O, y 53.58 a 52.83 ° N. El remolino anticiclónico estuvo localizado al norte y el ciclónico al sur del dipolo. En las figuras 6 (a)-(c), se observa que el remolino ciclónico tuvo anomalías positivas de Chla superficial entre 0.5 a 1.5, comparado con el anticiclónico, con valores entre 0 y 1 desviaciones estándar.

La figura 7 (a) muestra que el perfil del sensor MODIS/Terra tuvo valores de 0.2 a 2.5 mgm^{-3}m . Luego de 1.5 horas, el sensor SeaWiFS mostró valores entre 0.2 a 1 mgm^{-3}m y, por último, MODIS/Aqua tuvo valores de 0.2 a 0.7 mgm^{-3}m . Claramente se observa una disminución de Chla, desde el primer hasta al tercer pase. En la figura 7 (b), se observa la estructura del dipolo 1, con un diámetro total de 66 Km, 36 Km para el remolino anticiclónico, un tallo de 11 Km y un diámetro de 19 Km para el remolino ciclónico.

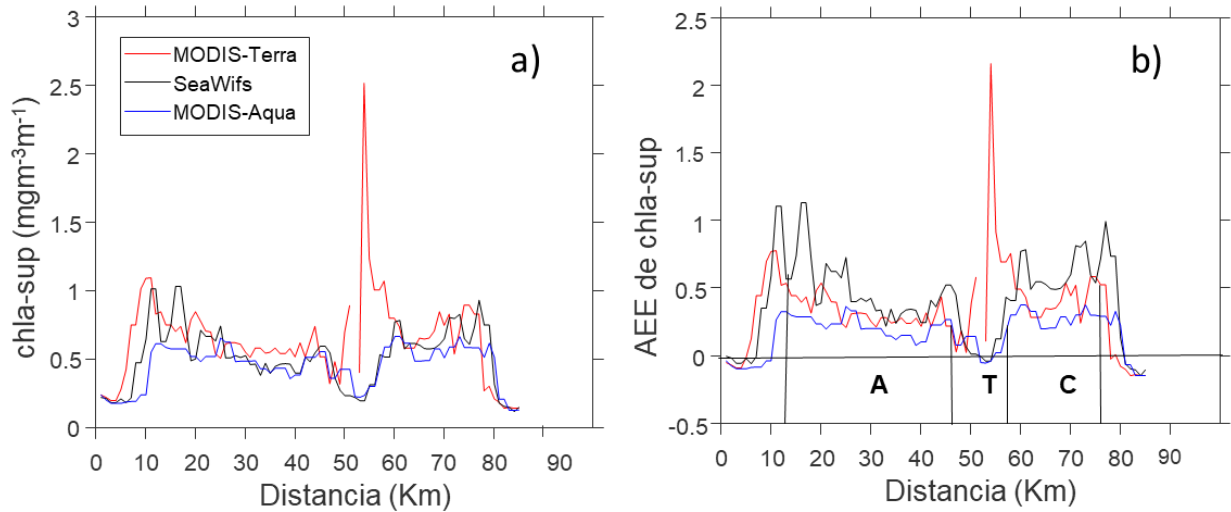


Figura 7. Perfiles diagonales en el dipolo 2. **a)** Chla-sup, **b)** AEE de Chla-sup.

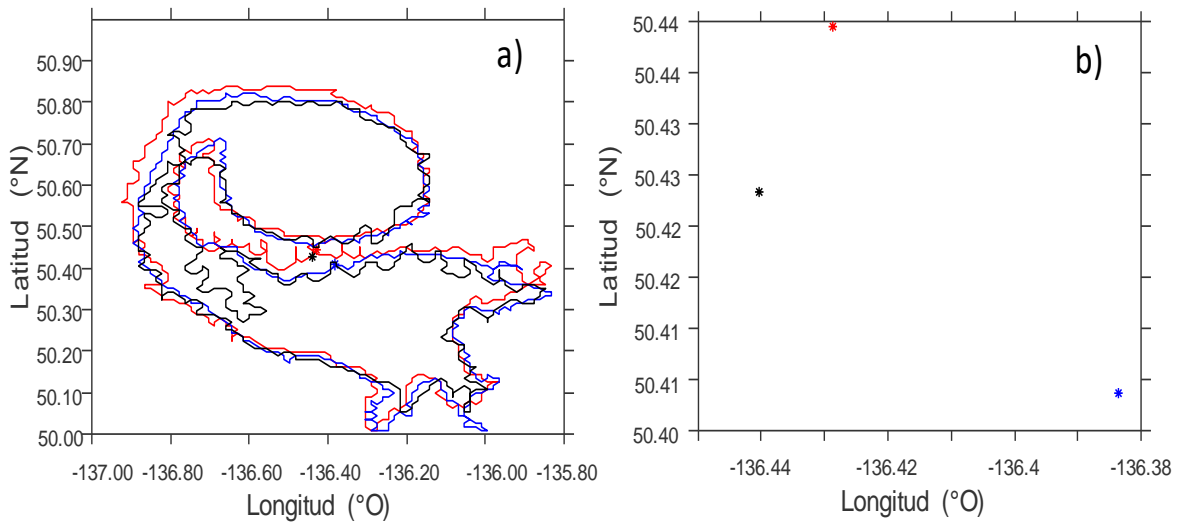


Figura 8. Desplazamiento del dipolo 1 en las Islas Reina Charlotte. **a)** corresponde al contorno 0.4, **b)** corresponde a los centros geométricos de cada contorno. El color rojo corresponde al sensor MODIS/Terra, el azul a SeaWiFS y el negro a MODIS/Aqua.

En los casos de los dipolos de Charlotte, la parametrización se realizó en toda la estructura dipolo, ya que no se pudo obtener un contorno para cada remolino. La Tabla III nos muestra los diferentes contornos con los que se definió y caracterizó la primer estructura dipolo. Tomando como referencia un solo valor de contorno, la

figura 8a muestra el contorno 0.4 para los sensores MODIS/Terra, SeaWiFS y MODIS/Aqua, donde existe una disminución de tamaño desde el primer pase al tercero. Se observa que a medida que el tiempo avanza, el área de la estructura disminuyó con un área inicial de 3904 Km², un área intermedia de 3262 Km² y un área final de 3008 Km². Esta tendencia se observó en el resto de los contornos. En el caso del perímetro, el patrón de disminución no fue evidente, dada la forma irregular de los contornos. En el pase de MODIS/Terra el perímetro fue de 480 Km, el pase intermedio fue de 573 Km y el final de 459 Km. En el parámetro de excentricidad los tres pases fueron similares, con un promedio de 0.81, que indica que los contornos no se ajustan a una figura circular. El cálculo de excentricidad en las imágenes de los tres sensores, indica que el dipolo 1 se movió en dirección noreste, aunque en la figura 9b, los centros geométricos tienen un desplazamiento hacia el sur.

Tabla III. Parámetros de la estructura dipolo 1 de las Islas Reina Charlotte

Sensor	Contorno	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Excentricidad (0-1)
MODIS-Terra	0.4	3904	480.13	-60.92	0.79
	0.5	3280	623	-61.54	0.79
	0.6	2569	579.47	-62.34	0.83
SeaWifs	0.4	3262	573.62	-62.54	0.80
	0.5	2485	576.80	-64.25	0.82
	0.6	1625	646.61	-65.12	0.81
	0.35	3364	470.47	-61.47	0.77

MODIS- Aqua	0.4	3008	459	-0.62	0.77
	0.5	1245	317	-0.17	0.8

Finalmente, se obtuvieron los centros geométricos de cada contorno, como un punto de referencia del cambio de posición entre los tres pases. Del MODIS/Terra a SeaWiFS el cambio fue de 3.20 Km en 1.5 h, y de SeaWiFS a MODIS/Aqua de a 4.02 Km en 1 h, con una velocidad aproximada de 2.13 Km h⁻¹ y 4 Km h⁻¹, respectivamente. La velocidad promedio por día fue de aproximadamente 3.06 Km h⁻¹.

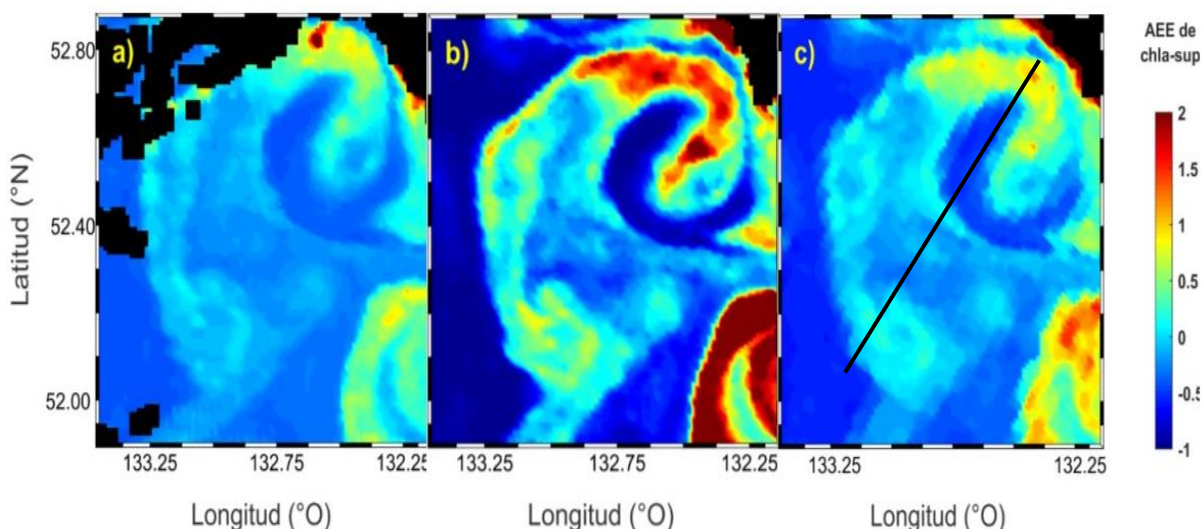


Figura 9. AEE de la Chla-sup del dipolo 2. **a)** pase MODIS/Terra, **b)** pase SeaWiFS y **c)** pase MODIS/Aqua. La línea negra es el transecto diagonal.

Descripción del dipolo 2

El dipolo 2 se encontró entre los 133.33 a 132.75 ° O, y 52.80 a 52°N. El remolino ciclónico está ubicado al sur y el anticiclónico al norte (Fig. 9).

En la figura 10 (b), se observa que tanto el tallo como el remolino ciclónico tuvieron AEE de Chla-sup de 0.5 y el remolino anticiclónico, valores entre 1.5 y 2 anomalías estándar. Lo anterior, también puede verse en las figuras 3-5 sección (a), donde el remolino anticiclónico fue el que presentó mayores concentraciones de Chla, con valores de hasta 3.5 mgm^{-3} y el ciclónico con valores de 0.5 mgm^{-3} .

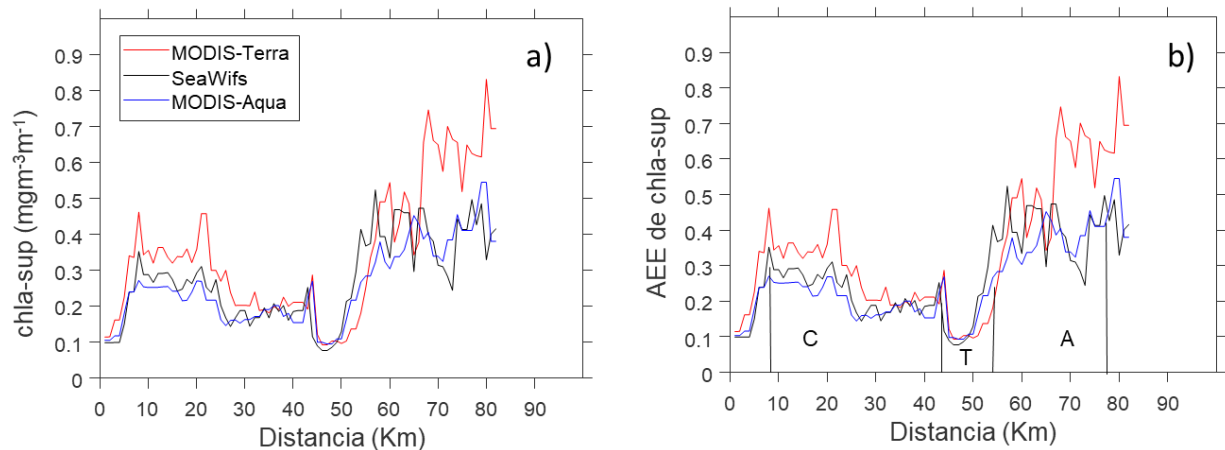


Figura 10. Perfiles del dipolo 1 para los sensores MODIS/Terra, SeaWiFS, MODIS/Aqua. **a)** Chla-sup, **b)** AEE de Chla-sup.

La figura 10 (a) muestra que a través de un perfil diagonal sobre el dipolo 2, se puede observar cada componente de este. El tallo fue el que tuvo menores valores en toda la estructura, con valores de hasta $0.1 \text{ mgm}^{-3} \text{ m}^{-1}$, mientras que el remolino ciclónico presentó valores de $0.3 \text{ mgm}^{-3} \text{ m}^{-1}$ y el anticiclónico tuvo valores de hasta $0.5 \text{ mgm}^{-3} \text{ m}^{-1}$.

En la figura 10 (b), se definen el remolino ciclónico con un diámetro de 43 Km, un tallo de 11 Km y un diámetro de 34 Km para el remolino anticiclónico. El diámetro para la estructura dipolo fue de 88 Km.

La Tabla IV muestra los diferentes parámetros de la estructura dipolo 2, donde el área del pase MODIS/Terra fue de 2247 Km², la del SeaWiFS de 2066 Km² y la de MODIS/Aqua, de 2391 Km²; siendo esta última la mayor área. Si bien, no se evidenció una tendencia de disminución de área, el perímetro experimentó una reducción con el tiempo, con 673, 644 y 500 Km para los tres pases. El valor de la excentricidad indica que los dipolos identificados no se parecen a un círculo, con valores promedio de 0.84. la orientación indica que el movimiento del dipolo fue hacia el suroeste, lo que coincide con la figura 11 (b), con los centros geométricos de cada contorno.

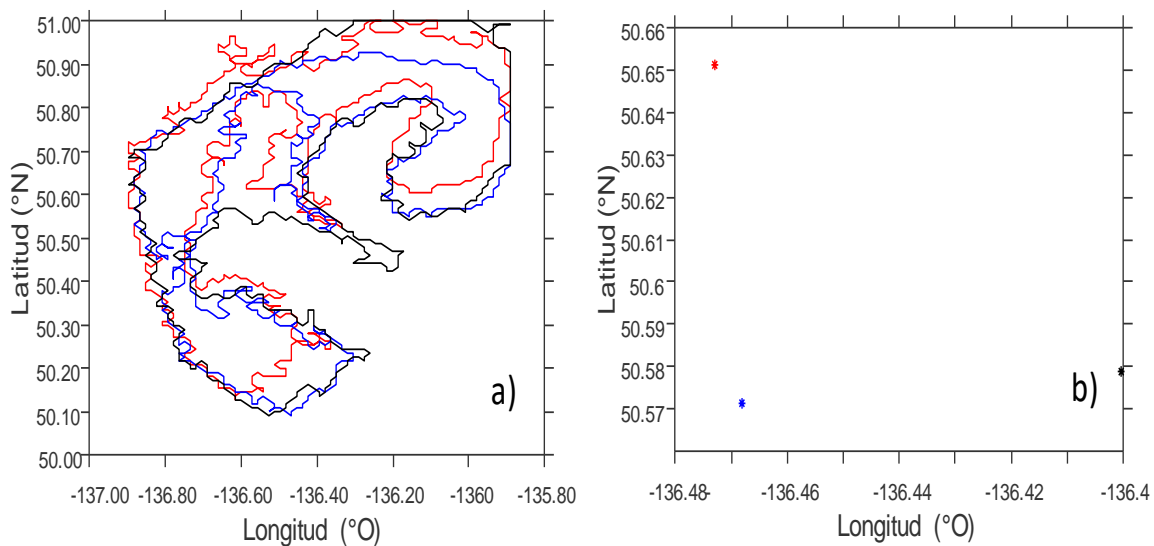


Figura 11. Desplazamiento del dipolo 2. **a)** corresponde al contorno 0.4, **b)** corresponde a los centros geométricos de cada contorno. El color rojo corresponde al sensor MODIS/Terra, el azul a SeaWiFS y el negro a MODIS/Aqua.

La trayectoria del dipolo 2 se puede observar en la figura 11 (b), donde la distancia de desplazamiento del centro MODIS/Terra al SeaWiFS fue de 1.52 Km y en 1.5 h, mientras que para el SeaWiFS al MODIS/Aqua fue de 4.79 Km en 1 h, con una

velocidad aproximada de 1.01 Km h⁻¹ y 4.79 Km h⁻¹, respectivamente. La velocidad promedio por hora fue de aproximadamente 2.90 Km h⁻¹

Tabla IV. Parámetros de la estructura dipolo 2 de Islas Reina Charlotte

Sensor	Contorno	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Excentricidad
MODIS-Terra	0.31	2247	673	-58.60	0.85
SeaWifs	0.25	2066	644	-64.07	0.82
Modis-Aqua	0.20	2931	500	-63.37	0.85

3.2. Estructura dipolo en el sur del Golfo de California

En esta sección se muestran los resultados de la identificación y análisis del dipolo del sur del Golfo de California. En este caso, la parametrización se realizó en los días 11 y 12 de julio del 2010, ya que fueron los únicos días donde se encontró la estructura dipolo, ubicada entre los 109.33 a 108.50° O y 25.80-25° N. Sin embargo, no se pudo identificar el contorno del remolino anticiclónico para el 11 y 12 de julio del 2010, por lo que sólo se parametrizó la parte ciclónica del dipolo.

De las figuras 12(a)-13(a), muestran la concentración de Chla, la sección (b) el K_d (490), la (c) las AEE de Chla, la (d) la concentración de Chla-sup, la (e) las AEE de Chla-sup y f, la 1°PO, para los días 11 y 12 de julio del 2010.

Podemos darnos una idea de la dimensión del perímetro a través del perfil diagonal que se trazó en toda la estructura dipolo (Fig. 14), con diámetros de 68 Km para el 11 de julio y 71 Km para el 12 de julio. Este perfil también nos indica la

concentración de Chla-sup en todo el dipolo, con valores mínimos de $0.01 \text{ mgm}^{-3} \text{ m}^{-1}$ en el remolino anticiclónico y máximos de $0.035 \text{ mgm}^{-3} \text{ m}^{-1}$ en el ciclónico.

El contorno de referencia del remolino ciclónico para los dos días fue de 0.98 (Fig. 15). La tabla V muestra los parámetros de este contorno, con un área de 960 Km^2 y un perímetro de 188 Km para el 11 de julio y un área de 963 Km^2 con perímetro de 211 Km para el 12 de julio. En esta misma figura se observan los centros geométricos de ambos contornos, teniendo un desplazamiento de 4.5 Km del día 11 al día 12, con una velocidad de 2.83 ms^{-1} . Respecto a la excentricidad, el remolino ciclónico del día 11 fue más parecido a una figura semi circular, mientras que el día 12, no se ajustó a un círculo, con un valor de 0.85. La orientación para los cuatro contornos, indicó que el movimiento fue hacia el noreste.

El remolino A sólo se encontró para el 11 de julio, con un contorno de -0.77 anomalías, un área de 655 Km^2 y un perímetro de 209 Km.

Tabla V. Parámetros del remolino ciclónico del sur del Golfo de California.

Tiempo(d)	Contorno	Área (Km²)	Perímetro (Km)	Orientación (°)	Excentricidad
	0.98	960	188	-83.25	0.59
11-07-2010	0.99	955	189	-83.28	0.59
	0.98	963	211	-14.57	0.85
12-07-2010	0.99	949	209	-14.55	0.85

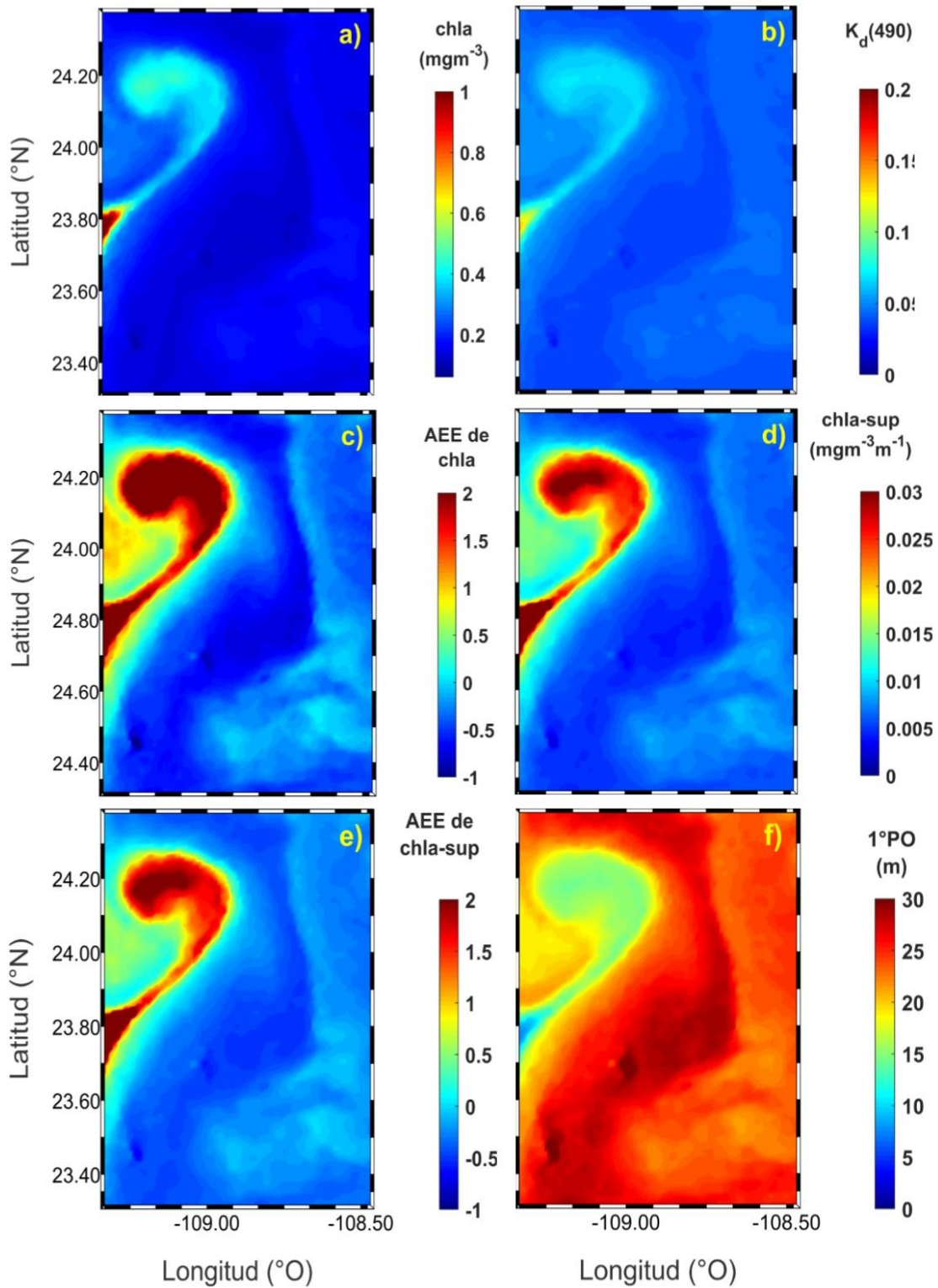


Figura 12. Imágenes del día 11 de julio del 2010. **a)** Chla, **b)** K_d(490), **c)** AEE de Chla, **d)** relación de Chla y 1°PO, **e)** AEE de Chla-sup y **f)** 1°PO.

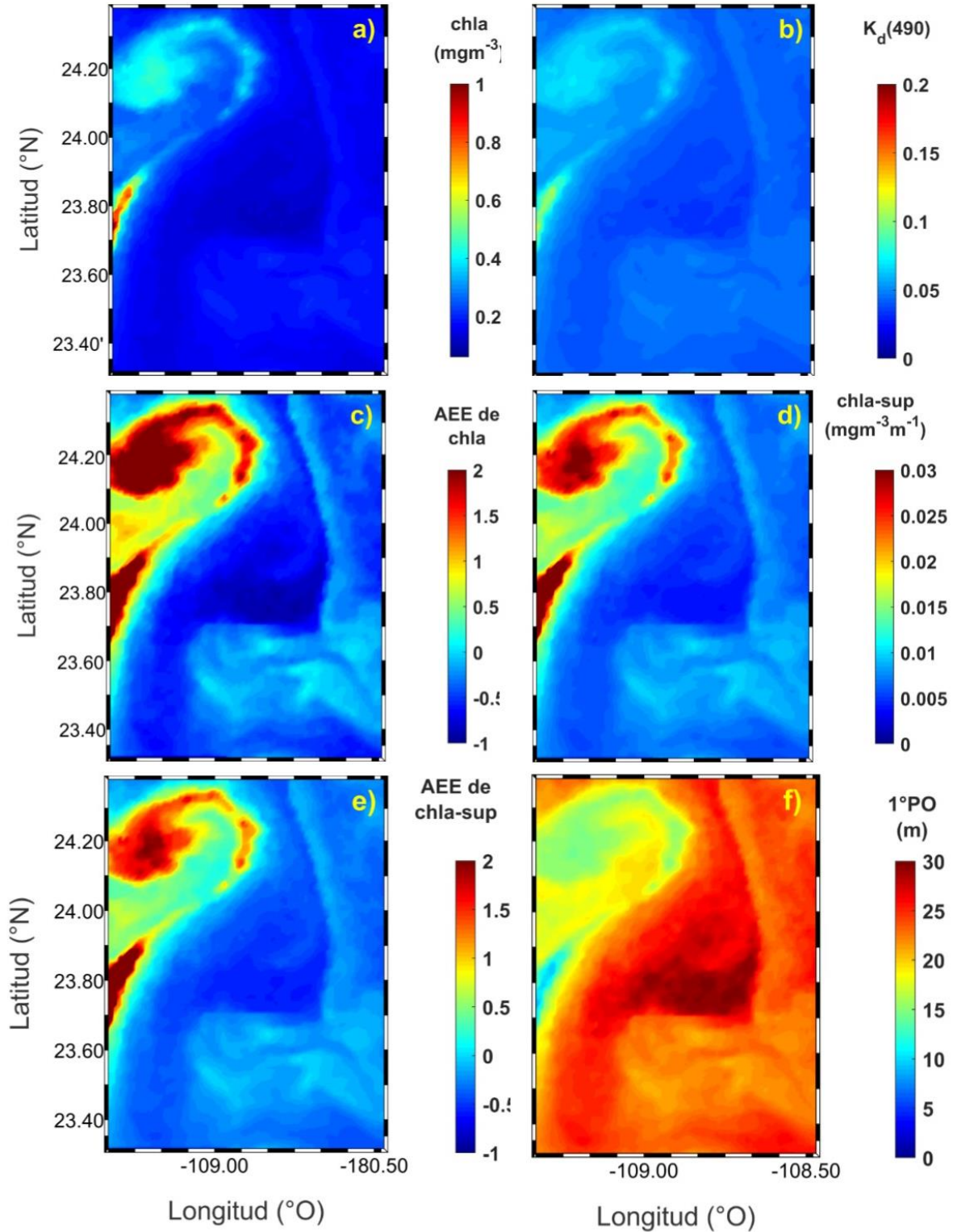


Figura 13. Imágenes del día 12 de julio del 2010. **a)** Chla, **b)** $K_d(490)$, **c)** AEE de Chla, **d)** relación de Chla y 1°PO , **e)** AEE de Chla-sup y **f)** 1°PO .

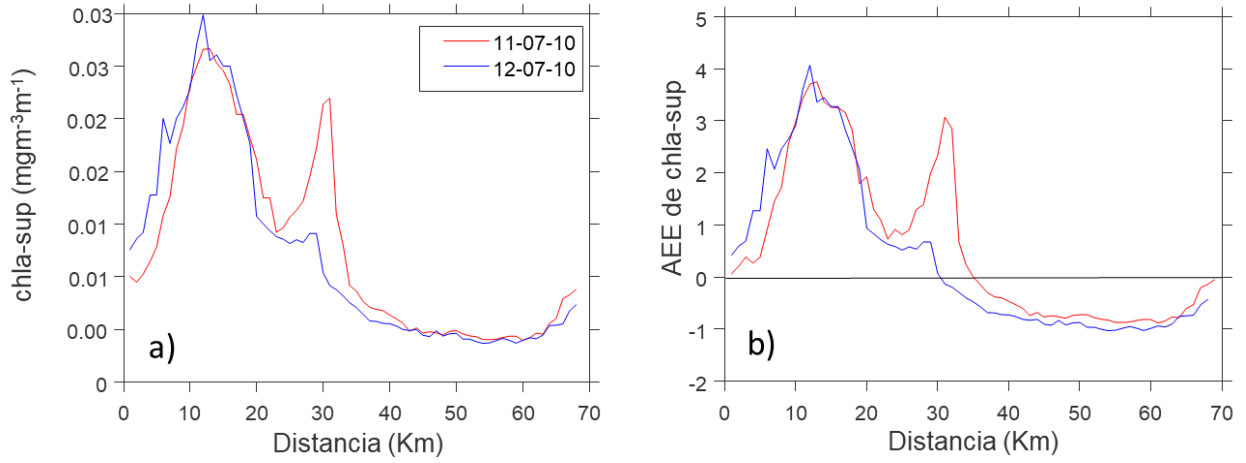


Figura 14. Perfiles diagonales en el dipolo del sur del Golfo de California. **a)** Chla-sup, **b)** AEE de chla-sup.

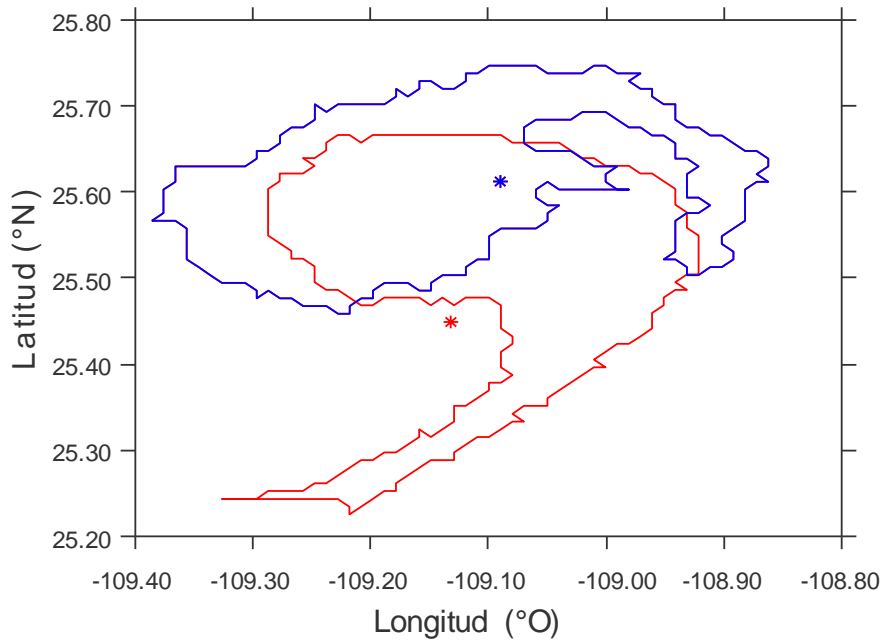


Figura 15. Contorno del remolino ciclónico del sur del Golfo de C. La línea roja corresponde al día 11-09-10 y la línea azul al día 12-09-10.

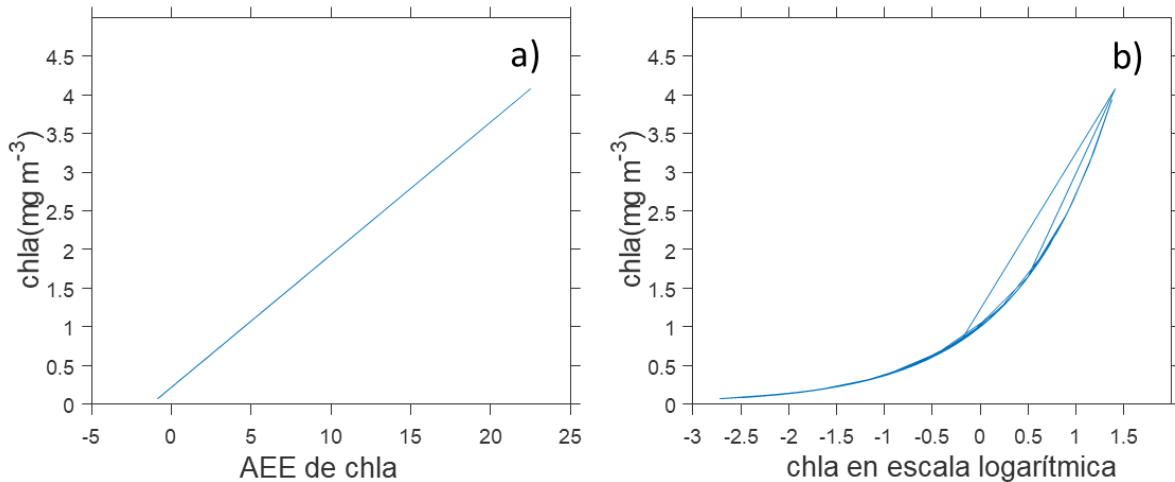


Figura 16. Comportamiento de los datos de Chla. **a)** representa la concentración de Chla en función de las AEE de Chla y **b)** la concentración de Chla en función de Chla en escala logarítmica.

Finalmente, se probaron dos transformaciones estadísticas a los datos de Chla de día 11-07-2010 del sur del Golfo de California (Fig. 16). La sección 16 (a) muestra la Chla en función de las AEE de Chla, cuya tendencia es lineal, mientras que la sección 16 (b) muestra la Chla en función del logaritmo de Chla, con tendencia logarítmica.

CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN

Aunque se han reportado múltiples trabajos sobre las estructuras dipolo con diferentes productos satelitales, existen algunas restricciones sobre estos. Por ejemplo, el uso de datos de The Thematic Mapper puede no ser conveniente en zonas con condiciones oligotróficas (<2 mgm³) (Kirk, 2011). La resolución promedio de los trabajos que utilizaron altimetría, fue de 27 Km por lo que, en ocasiones, podrían limitar la identificación de estructuras dipolo, un ejemplo de esto es lo que reportaron Marcello *et al.* (2015), donde utilizaron imágenes de K_d

(490) de los sensores MODIS/Aqua, MODIS/Terra (1000 m de resolución) y Meris (300 m de resolución), para identificar un remolino anticiclónico. Mencionan que los datos a esa resolución proporcionaron información valiosa a una resolución que no se puede alcanzar con los campos de anomalías del nivel del mar. Los trabajos con imágenes de temperatura superficial del mar tienen la desventaja de que las mediciones de temperatura satelital provienen de los primeros micrones de profundidad (Wentz *et al.*, 2000), aproximadamente 10 μm (Donlon *et al.*, 2002), homogenizando la capa superficial e impidiendo la detección de estructuras de mesoescala. Además, aunque existan metodologías con imágenes de temperatura superficial del mar, como las que desarrollaron Castellani (2005) y Karoui *et al.* (2010), debe de existir un pre procesado en las imágenes para utilizarlas. En cambio, las imágenes de Chla tienen la ventaja de que provienen de la 1°PO (Kirk, 2011), la cual puede ser de hasta 30 m (caso contrario a las de temperatura superficial del mar $\sim 10 \mu\text{m}$ de profundidad) y en ocasiones, datos de Chla satelital pueden servir para compararlos con datos *in situ*, como lo hicieron Lavín *et al.* (2013) con remolinos de mesoescala en el Golfo de California. Sin embargo, la identificación de estructuras dipolo difícilmente se puede hacer sobre imágenes de Chla, ya que la concentración de esta no es homogénea en toda la estructura. Hong *et al.* (2011) desarrollaron un algoritmo de detección de remolinos basado en la transformada de Wavelet y Houg, sobre imágenes de clorofila del sensor Modis a una resolución de 4 Km y concluyeron que su metodología permite identificar con mayor facilidad remolinos con núcleos fríos que remolinos con núcleos cálidos, lo cual puede ser explicado por las bajas concentraciones de Chla en el remolino cálido. Si a esto le sumamos que el cálculo de Chla satelital no sólo

utiliza un algoritmo con escala exponencial, sino que, dentro de este, las reflectancias son calculadas de manera logarítmica (O'Reilly, 1998), remolinos con concentraciones mayores de Chla, se observarían con mejor detalle que remolinos con menor concentración de Chla. Para solucionar lo anterior y con el fin de que ambas estructuras se resaltaran, se buscó una transformación que no afectara la distribución espacial de los datos, utilizando las anomalías espaciales estandarizadas propuestas por (Santamaría-del-Ángel, 2011), contrastando con la transformación logarítmica aplicada por He *et al.* (2015) a datos de Chla en la detección de remolinos y dipolos. Sin embargo, el utilizar transformaciones logarítmicas a datos de Chla satelital, rompe la integridad espacial de los datos. Para demostrar lo anterior, se graficó la concentración de *Chla* del 11-07-2010 del sur del Golfo de California en función de las anomalías espaciales estandarizadas de Chla, donde se muestra que las anomalías espaciales estandarizadas mantienen la integridad de los datos de Chla, al tener una tendencia lineal (Fig. 16a). De igual forma, se graficó la Chla en función del logaritmo de Chla y se puede observar que los datos rompen con la tendencia lineal de los datos (Fig. 16b). Con lo anterior, consideramos que las anomalías espaciales estandarizadas son adecuadas en la interpretación de los datos al delimitar contornos, como lo muestra Callejas-Jiménez *et al.* (2012). Otro punto importante sobre los datos de Chla, es que estos provienen de la 1°PO, por lo que cada pixel tuvo que ser estandarizado al primer metro de profundidad, dando como resultado la variable Chla-sup, la cual definió mejor las estructuras dipolo que la misma Chla para los tres casos.

En el caso de los dipolos de Isla Reina Charlotte, el dipolo 1 se comparó con los reportados por Callendar *et al.* (2011) debido a la ubicación geográfica cercana. Las dimensiones de los remolinos ciclónicos reportados por dichos autores oscilan entre 25 y 30 Km para los remolinos ciclónicos y 25 Km para los anticiclónicos, siendo parecidos a los encontrados en este trabajo. La velocidad encontrada en este trabajo fue aproximadamente de 3.06 Km h^{-1} mientras que la reportada por Callendar *et al.* (2011), fue de 0.25 Km h^{-1} . Estas diferencias de velocidad podrían deberse a la metodología empleada en el cálculo de velocidades, ya que Callendar *et al.* (2011) utiliza un modelo numérico para generar el campo de vorticidades y simular las estructuras dipolo, mientras que las calculadas en este trabajo dependerán sí y sólo sí, de la distancia recorrida y del delta de tiempo, del centro geométrico del contorno n al contorno $n+1$. Por ejemplo, la diferencia en tiempo del sensor MODIS/Terra al SeaWiFS, es de 1.5 h en 3.20 Km de recorrido, mientras que, del SeaWiFS al MODIS/Aqua, la diferencia es de 1 h con 4 Km. Cabe señalar que, entre más pases se tengan en un mismo día, la velocidad será más exacta.

Para el caso del sur del Golfo de California, la velocidad horizontal del centro del remolino ciclónico fue de 4.5 Km del día 11 al día 12, con una velocidad de 2.83 m s^{-1} (Fig. 15). Apango-Figueroa *et al.* (2015) mostró velocidades aproximadas de 0.2 m s^{-1} y Sánchez-Velasco *et al.* (2013) velocidades de 0.4 y 0.6 m s^{-1} . El área y perímetro promedio de los cuatro contornos calculados en este trabajo fueron de 956 Km^2 y 199 Km , respectivamente. Marcello *et al.* (2015) delimitaron contornos con el método de umbral para un remolino anticiclónico en la Isla del Hierro con

imágenes de K_d (490) y obtuvieron un área de 623 Km² y un perímetro de 187 Km, valores parecidos al remolino del sur del Golfo de California, que si bien, no son comparables debido a la posición geográfica de cada área, brindan confiabilidad en el valor de los parámetros, ya que fueron calculados con la misma metodología.

El combinar la identificación y la parametrización de estructuras dipolo con anomalías espaciales estandarizadas de Chla-sup en dos áreas de diferentes condiciones oceanográficas, permitió conocer contornos de toda la estructura o por componente (remolino ciclónico y anticiclónico). En el caso de los dipolos de Isla Reina Charlotte, se identificó el contorno para toda la estructura y no por componente. Lo anterior, pudo deberse a que los valores de Chla-sup eran muy parecidos en ambos remolinos. En el caso del sur del Golfo de California, sólo se encontró el contorno del remolino ciclónico para el 11 de julio y 12 de julio. Se piensa que el contorno del remolino anticiclónico no se pudo delimitar debido a que toda la parte del anticiclónico tenía concentraciones similares, siendo una zona oligotrófica (<2 mgm⁻³). Lo anterior se puede explicar a que la región sur del golfo es una zona de transición compleja (Douglas *et al.*, 1993), dado que presenta convergencia de Agua del Golfo de California, el Agua Superficial Ecuatorial y Agua Subsuperficial Subtropical, lo cual determina los procesos físicos, químicos y biológicos que se llevan a cabo en dicha región; esto aunado al gran forzamiento dinámico que ejerce el Océano Pacífico sobre la zona (Lavin *et al.*, 2009). Esta dinámica ocasiona que la zona eufótica presente bajas concentraciones de nutrientes y oxígeno disuelto, con baja salinidad y alta

temperatura, estas condiciones le confieren a la región sur características oligotróficas (Alvarez-Borrego *et al.*, 1991; Valdez-Holguin *et al.*, 2007).

Como se mencionó anteriormente, del periodo de tiempo para Islas Reina Charlotte, sólo se encontró un sistema de tres estructuras dipolo, pero se identificaron dos, por lo que se piensa que las estructuras dipolo no son estructuras permanentes. Callendar *et al.* (2011) realizaron un modelo numérico donde el principal forzante era la marea, que actuaba como mecanismo de generación de un sistema de dipolos en las Islas Reina Charlotte, para explicar la presencia de estas estructuras, ya que según Crawford (2002) los remolinos que se generan en Islas Reina Charlotte son de rotación anticiclónica y son formados cada invierno en la punta sur de las islas, cuando los flujos impulsados por presión desde el Estrecho de Hécate se encuentran con una plataforma continental estrecha y una batimetría escarpada. Di Lorenzo *et al.* (2005), también demuestran que los remolinos de Islas Reina Charlotte son generados en la punta sur de las islas cada invierno y son producto de la fusión de remolinos pequeños generados al noroeste de Cabo James. La corta permanencia de las estructuras dipolo coincide con lo reportado por Ridderinkhof *et al.* (2013) en el canal de Mozambique, ya que en esta área se forman de cuatro a seis dipolos por año y poco después de su formación, se rompen al interactuar con otros remolinos de mesoescala. Hooker *et al.* (1995), mencionan cuatro dipolos en la Corriente del Golfo con permanencias entre 3 semanas y 4 meses, siendo este el reporte de mayor permanencia para una ED. La no permanencia de las estructuras dipolo en las Islas Reina Charlotte puede ser explicada por vientos (Callendar *et al.*, 2011),

coincidiendo con Wang *et al.*, (2006), quienes atribuyen al viento la generación de estructuras dipolo al sur del mar de China.

En el caso del sur del Golfo de California, Apango-Figueroa *et al.* (2015) reportaron que la estructura dipolo se mantuvo del 11 al 19 de julio, sin embargo, con la metodología aplicada, se identificó en los días de 11 y 12 de julio del 2010. Estos días también fue donde la estructura tuvo mayores concentraciones de Chla.

En teoría, se menciona que los remolinos ciclónicos presentan concentraciones altas de Chla y los anticiclónicos, concentraciones bajas en su centro (para el hemisferio norte). En este estudio, se analizaron dos áreas de estudio con características biológicas y oceanográficas contrastantes y los resultados obtenidos permiten inferir, que el principio teórico propuesto no se cumple en todos los casos, ya que los dos componentes del dipolo 1 de Charlotte, presentaron características correspondientes a las de un remolino ciclónico con concentraciones mayores a 3 mgm^{-3} de Chla; del mismo modo, en el dipolo 2, el remolino anticiclónico tuvo mayores concentraciones que el ciclónico. En el caso del dipolo del sur del golfo, el remolino anticiclónico sí cumplió con la descripción teórica, ya que el ciclónico presentó mayores concentraciones que el anticiclónico.

CONCLUSIONES

El análisis de imágenes de Chla y $K_d(490)$ permitió inferir que el uso de una imagen compuesta no siempre confiere una mejor definición para la identificación de estructuras dipolo, por lo que el análisis por sensor constituye una

aproximación viable para la caracterización de fenómenos oceanográficos en periodos menores a un día, siempre y cuando, se cuente con información proveniente de mínimo dos pases y/o sensores. La detección de dipolos en las zonas estudiadas mediante el empleo de estos productos satelitales fue posible; sin embargo, la transformación mediante las AEE de Chla y Chla-sup, facilitó la identificación de la totalidad de las estructuras o de sus componentes por separado, mediante mapas de isolíneas de Chla-sup, lo cual representa una ventaja respecto a las imágenes de Chla. Pese a la funcionalidad de la metodología empleada en la identificación de estructuras dipolo, su uso está restringido a la resolución espacial, la nubosidad, presencia del sol y a la 1°PO de las imágenes de Chla y K_d (490). La descripción y parametrización de las estructuras dipolo presentadas, constituye una buena aproximación, que, combinada con otras metodologías, puede arrojar resultados más exactos.

REFERENCIAS

- Ahlnas, K., T. C. Royer, y T. H. George. 1987. "Multiple dipole eddies in the Alaska Coastal Current detected with Landsat thematic mapper data". *Journal of Geophysical Research* 92 (C12): 13041–13047. doi:10.1029/JC092iC12p13041.
- Alvarez-Borrego, S., y R Lara-Lara. 1991. "The physical environment and primary productivity of the Gulf of California". *American Association of Petroleum Geologists* 47 (January): 555–567.
- Apango-Figueroa, E., L. Sánchez-Velasco, M. F. Lavín, V. M. Godínez, y E. D. Barton. 2015. "Larval fish habitats in a mesoscale dipole eddy in the gulf of California". *Deep-Sea Research Part I* 103. Elsevier: 1–12. doi:10.1016/j.dsr.2015.05.005.
- Callejas-Jiménez, M., E. Santamaria-del-Ángel, A. Gonzalez-Silvera, R. Cajal-Medrano, y R. Millan-Nuñez. 2012. "Dynamic Regionalization of the Gulf of Mexico based on normalized radiances (nLw) derived from MODIS-Aqua". *continental shelf research* 37: 8–14. doi:10.1016/j.csr.2012.01.014.

- Callendar, W, J. M. Klymak, y M. G. G. Foreman. 2011. "Tidal generation of large sub-mesoscale eddy dipoles". *Ocean Science* 7: 487–502. doi:10.5194/os-7-487-2011.
- Castellani, M. 2005. "Automatic detection of Mediterranean water eddies from satellite imagery of the Atlantic Ocean". En *Intelligent Production Machines and Systems*, 1–8.
- Castro, R., A. Mascarenhas, R. Durazo, y C. Collips. 2000. "Variación estacional de la temperatura y salinidad en la entrada del Golfo de California, México". *Ciencias Marinas* 26 (4): 561–583.
- Chelton, D. B., M. G. Schlax, y R. M. Samelson. 2011. "Progress in Oceanography Global observations of nonlinear mesoscale eddies". *Progress in Oceanography* 91 (2). Elsevier Ltd: 167–216. doi:10.1016/j.pocean.2011.01.002.
- Cheng, Y., C. Ho, Q. Zheng, y N. Kuo. 2014. "Statistical Characteristics of Mesoscale Eddies in the North Pacific Derived from Satellite Altimetry". *remote sensing* 6: 5164–5183. doi:10.3390/rs6065164.
- Crawford. W.R. 2002. "Physical characteristics of Haida Eddies". *Journal of Oceanography* 58 (5): 703–713. doi:10.1023/A:1022898424333.
- Darecki, M., y D. Stramski. 2004. "An evaluation of MODIS and SeaWiFS bio-optical algorithms in the Baltic Sea". *Remote Sensings of Environment* 89: 326–350. doi:10.1016/j.rse.2003.10.012.
- Di Lorenzo, E., M. G.G. Foreman, y W. R. Crawford. 2005. "Modelling the generation of Haida Eddies". *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 52 (7–8): 853–873. doi:10.1016/j.dsr2.2005.02.007.
- Donlon, C. J., P. J. Minnett, C. Gentemann, T. J. Nightingale, I. J. Barton, B. Ward, y M. J. Murray. 2002. "Toward improved validation of satellite sea surface skin temperature measurements for climate research". *Journal of Climate* 15 (4): 353–369. doi:10.1175/1520-0442(2002)015<0353:TIVOSS>2.0.CO;2.
- Douglas, M W., R A. Maddox, y K. Howard. 1993. "The Mexican Monsoon". *American Meteorological Society* 6: 1665–1677.
- Esquivel-Trava, B. 2004. Análisis de una imagen SAR aplicando las transformadas Radon y Wavelet para mejorar la visualización de ondas superficiales e internas en el océano. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, México, 69 pp
- Faghmous, J H., I. Frenger, Y. Yao, R. Warmka, A. Lindell, y Vi. Kumar. 2015. "A daily global mesoscale ocean eddy dataset from satellite altimetry". *Scientific Data*, 1–16. doi:10.1038/sdata.2015.28.
- Falkowski, P. G., D. Ziemann, Z. Kolber, y O. K Bienfang. 1991. "Role of eddy

pumping in enhancing primary production in the ocean". *nature*, 1–4.

- Gonzalez-Silvera, A., E. Santamaria-del-Ángel, y R. Millán. 2004. "Satellite observations of mesoscale eddies in the Gulfs of Tehuantepec and Papagayo (Eastern Tropical Pacific)". *Deep-Sea REsearch PArt II* 51: 587–600. doi:10.1016/j.dsr2.2004.05.019.
- He, Q., H. Zhan, S. Cai, y G. Zha. 2015. "On the Asymmetry of Eddy-induced Surface Chlorophyll Anomalies in the Southeastern Pacific : The Role of Eddy-Ekman Pumping Progress in Oceanography On the asymmetry of eddy-induced surface chlorophyll anomalies in the southeastern Pacific : The role of e". *PROGRESS IN OCEANOGRAPHY* 141 (January). Elsevier Ltd: 202–211. doi:10.1016/j.pocean.2015.12.012.
- Hirawake, T., S. Kudoh, S. Aoki, y S. R. Rintoul. 2003. "Eddies revealed by SeaWiFS ocean color images in the Antarctic Divergence zone near 140 ° E". *Geophysical Research letters* 30 (9): 9–12. doi:10.1029/2003GL016996.
- Hong, Y., K. Linchun, H. Mingyuan, y M. Observatory. 2011. "Research on the eddy detection method based on chlorophyll concentration distribution". En , 2010:1958–1962.
- Hooker, S B., J W. Brown, y A D. Kinvan. 1995. "Detecting ' Dipole Ring ' Separatrices with Zebra Palettes". *IEEE transactions on geoscience and remote sensing* 33 (6): 1306–1312.
- Huerta-Escamilla, A. 2013. "Remolinos en el Golfo de Tehuantepec y Golfo de Papagayo. Tendencias espacio temporales de la concentración de clorofila dentro de los remolinos. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California."
- Isern-Fontanet, J, E. Garcia-Laadona, y J Font. 2002. "Identification of Marine Eddies from Altimetric Maps". *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 20: 772–778.
- Karoui, I., H. Chauris, P. Garreau, y P. Craneguy. 2010. "Multi-resolution eddy detection from ocean color and sea surface temperature images", 1–6.
- Kirk, J. T. 2011. *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*. doi:10.15713/ins.mmj.3.
- Kurczyn, J. A, E. Beier, M. F. Lavín, A. Chaigneau, y V. M. Godínez. 2013. "Anatomy and evolution of a cyclonic mesoscale eddy observed in the northeastern Pacific tropical-subtropical transition zone" 118: 1–20. doi:10.1002/2013JC009339.
- Lavín, M. F., R. Castro, E. Beier, y V. M. Godínez. 2013. "Mesoscale eddies in the southern Gulf of California during summer: Characteristics and interaction with the wind stress". *Journal of Geophysical Research: Oceans* 118 (3): 1367–1381. doi:10.1002/jgrc.20132.

- Lavin, M F, R. Castro, E. Beier, V. M. Godínez, A. Amador y P. Guest. 2009. "SST , thermohaline structure , and circulation in the southern Gulf of California in June 2004 during the North American Monsoon Experiment". *Journal of Gephysical Research* 114: 1–22. doi:10.1029/2008JC004896.
- Marcello, J, F. Eugenio, S. Estrada-Allis, y P. Sangrà. 2015. "Segmentation and Tracking of Anticyclonic Eddies during a Submarine Volcanic Eruption Using Ocean Colour Imagery". *Sesnsors* 15: 8732–8748. doi:10.3390/s150408732.
- Mcgillicuddy, D, J., A.R. Robinson, A. Siege, D, W. Jannasch, H, R. Johnson, D. Dickey, T, J. McNeil, F. Michaels, A, y H. Knap. 1998. "in the Sargasso Sea" 285 (1977): 263–266.
- Merino, M, y A. Monreal-Gómez. 2004. "Ocean Currents and their impact on marine life". *Marine Ecology. Encyclopedia of Life Support Systems. EOLSS/UNESCO. Oxford.*
- Morrow, R., y P. Le Traon. 2012. "Recent advances in observing mesoscale ocean dynamics with satellite altimetry". *Advances in Space Research* 50 (8). COSPAR: 1062–1076. doi:10.1016/j.asr.2011.09.033.
- NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Biology Processing Group; (2014): Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) Ocean Color Data, NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA. http://doi.org/10.5067/ORBVIEW-2/SEAWIFS_OC.2014.0. Accessed 2018/06 /15. Maintained by NASA Ocean Biology Distibuted Active Archive Center (OB.DAAC), Goddard Space Flight Center, Greenbelt MD
- O'Reilly, J, E. 1998. "Ocean color chlorophyll alogrithms for SeaWiFS". *J. Geophysc. Res.* 103 (C11): 24,937-24,953. http://scholarcommons.usf.edu/msc_facpub%0Ahttp://scholarcommons.usf.edu/msc_facpub/6.
- Pegau, W. S., E. Boss, y A. Marti. 2002. "Ocean color observations of eddies during the summer in the Gulf of California". *Geophysical Research letters* 29 (9): 29–31.
- Rhines, P. B. 2001. "Mesoscale eddies". En *Encyclopedia of Ocean Science*, 755–767.
- Ridderinkhof, W, D. Le Bars, A.S. Von Der Heydt, y W. P. M. De Ruijter. 2013. "Dipoles of the South East Madagascar Current". *Geophysical Research letters* 40: 558–562. doi:10.1002/grl.50157.
- Roberts, M., J. Ternon, y T. Morris. 2013. "Interaction of dipole eddies with the western continental slope of the Mozambique Channel". *Deep-Sea Research*
- Ruijter, W. P. M., M.V.A. De Hendrik, E. J. Beier, J.R. Lutjeharms, R. P Matano, y M. W Schouten. 2003. "Eddies and dipoles around South Madagascar: formation , pathways and large-scale impact". *Deep-Sea research I* 51: 383–

400. doi:10.1016/j.dsr.2003.10.011.

- Sánchez-Velasco, L., M. F. Lavín, S.P.A Jiménez-Rosenberg, V. M. Godínez, E. Santamaría-del-Ángel, y D. U. Hernández-Becerril. 2013. "Three-dimensional distribution of fish larvae in a cyclonic eddy in the Gulf of California during the summer". *Deep-Sea research I* 75: 39–51. doi:10.1016/j.dsr.2013.01.009.
- Santamaria-del-Ángel, E., A. González-Silvera, R. Millán-Nuñez, y F. Müller-Karger. 2002. "The color signature of the Ensenada front and its seasonal and interannual variability" 43 (July 1979): 155–161.
- Santamaría-del-Ángel, E., A. Gonzalez-Silvera, y R. Millan-Nuñez. 2011. "Determining Dynamic Biogeographic Regions using Remote Sensing Data". En *IOCCG*.
- Tawnya, D, P. 1997. "Studies on the Biological Oceanography of Haida Eddies. Tesis de Doctorado. The University of British Columbia, Canadá."
- Valdéz-Holguín, J. E., y T. L. Espinosa-Carreón. 2007. "Variabilidad interanual de clorofila en el Golfo de California". *Ecología Aplicada* 6 ((1,2)): 83–92. doi:10.21704/rea.v6i1-2.344.
- Wang, G., D.Chen, y J. Su. 2006. "Generation and life cycle of the dipole in the South China Sea summer circulation" 111: 1–9. doi:10.1029/2005JC003314.
- Wentz, F. J., C. Gentemann, D. Smith, y D. Chleton. 2000. "Satellite Measurements of Sea Surface Temperature Through Clouds". *Science* 288 (5467): 847–850. doi:10.1126/science.288.5467.847.