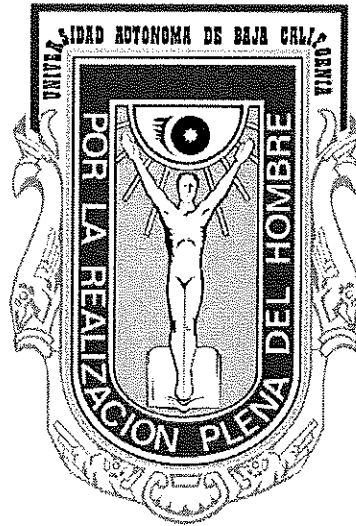


**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**



**“PROCESOS DE MESOESCALA EN EL GOLFO DE TEHUANTEPEC,  
OAXACA”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE**

**FISICO**

**PRESENTA:**

**ANGELICA MARIA ROMERO ARTEAGA**

**ENSENADA, B.C. SEPTIEMBRE DE 2008.**

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS

"PROCESOS DE MESOESCALA  
EN EL GOLFO DE TEHUANTEPEC, OAXACA."

TESIS PROFESIONAL

QUE PRESENTA:

ANGELICA MARIA ROMERO ARTEAGA

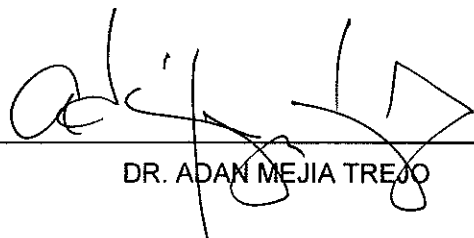
APROBADA POR:

  
\_\_\_\_\_  
DR. JOSÉ ANTONIO MARTÍNEZ ALCÁZAR

*Presidente*

  
\_\_\_\_\_  
M.C. FEDERICO ÁNGEL VELÁZQUEZ  
MUÑOZ

*Sinodal*

  
\_\_\_\_\_  
DR. ADÁN MEJÍA TREJO

*Sinodal*

## **Agradecimientos**

A mis padres, por su cariño, paciencia y amor incondicional. Por ser la base más importante de mi vida, gracias.

A mi hermano Roberto por compartir los momentos más importantes de mi vida.

A mi director de tesis Dr. José Antonio Martínez Alcalá por su predisposición constante a resolver cualquier duda. Por su paciencia, apoyo y orientación en esta tesis. Por ser una persona que inspiro en mí, la motivación para estudiar Oceanografía Física.

A Federico Velázquez por sus comentarios, sugerencias y por estar en la mejor de las disposiciones para ayudarme.

Así mismo agradezco a Adán Mejía por compartir sus conocimientos en esta área de la ciencia y por su cordial invitación para colaborar con la tripulación del barco oceanográfico de la Armada de México "Altair".

Gracias a los Tenientes: Guadalupe Morteo, Vladimir, Hilario, Nidia y muy en especial a Concepción por hacer mi estancia en el "Altair" una grata experiencia.

A mis maestros Selene Solorza, Javier Villegas, Claudio Valencia, Juan Tapia, Jesús Lerma y René Ortiz por resolver cada una de mis dudas dentro y fuera de clases.

A Paola por su apoyo incondicional, por compartir conmigo una etapa de cambios, por sus consejos, cuidados y lo más importante por enseñarme el valor de la amistad.

A Dulce, Fernanda y a mis amigas matemáticas Carmen y Sandra por compartir desveladas, risas, preocupaciones y triunfos en la carrera.

También deseo agradecer a Claudia y Mabel por tan lindas muestras de cariño durante todo este tiempo, sin duda alguna me tienen muy consentida.

A mis amigas biólogas Salome, Griss y Neftalí por su grata compañía en cualquier lugar a donde apuntara el pie, como la universidad, el invernadero y playitas. Por enseñarme la alegría de la vida, gracias.

Extiendo un agradecimiento para Yunuhen, Adriana y Maribel. Gracias por estos ocho años de amistad, espero que sigamos adelante como hasta ahora.

La lista de amigos es interminable, para los que se encuentran cerca: Eva, Yoshira, Lilia, Amalia, Ruth, Xochitl, Vicky, Alma, Sol Aldo, Richy, Israel, Antonio, Nelson, Ulises y Andrés. Para aquellos que están lejos: Liz, Giovanna y Cristian.

Gracias a todos por compartir conmigo el camino de la vida.

**RESUMEN** de la Tesis de **Angélica María Romero Arteaga**, presentada como requisito parcial para la obtención de la Licenciatura en FÍSICA.

Ensenada, Baja California, México. Septiembre de 2008.

**PROCESOS DE MESOESCALA  
EN EL GOLFO DE TEHUANTEPEC, OAXACA.**

**Resumen aprobado por:**



**Dr. José Antonio Martínez Alcalá**  
**Director de la Tesis**

Mediante datos de concentración de clorofila, obtenidos por el satélite MODIS-Aqua y datos de topografía dinámica absoluta (TDA) obtenidos mediante los satélites altimétricos, Topex/Poseidón, Jason-I, ERS-I, ERS-II, y Envisat, se pretende describir la relación que existe entre las altas concentraciones de clorofila-a en la zona del Golfo de Tehuantepec (GT) y la TDA. El periodo de estudio abarca del 6 de Julio de 2002 hasta el 23 de Octubre de 2007. El análisis estadístico de series de tiempo nos permite investigar, cómo evoluciona la concentración de clorofila, tanto en espacio y tiempo. Se realizaron comparaciones espaciales y temporales. La zona de alta variabilidad de TDA se bifurca en dos extremos, uno cerca de la costa del GT y otra al Golfo de Papagayo (GP), lo que hace suponer que la mayoría de los remolinos son formados en el GT y Papagayo. Sus trayectorias coinciden fuera de la costa al dirigirse hacia el oeste. En esta tesis se muestran evidencias de que los remolinos atrapan clorofila y la transportan hacia el oeste. El coeficiente de correlación ( $r$ ) de la muestra (clorofila-a y TDA) revela que se encuentran altas correlaciones ( $-0.80 \leq r \leq 0.84$ ) distribuidas hacia el oeste en dos franjas: una de correlación positiva que emana al norte del GT y hacia el oeste baja hasta los  $9^\circ$  N, y otra franja de correlación negativa al sur de la anterior.

# Índice

|                                          | Página    |
|------------------------------------------|-----------|
| <b>I. Introducción</b>                   | <b>1</b>  |
| I.1. Antecedentes                        | 2         |
| I.2. Zona de estudio                     | 4         |
| <b>II. Objetivo</b>                      | <b>7</b>  |
| <b>III. Metodología</b>                  | <b>8</b>  |
| III.1. Interpolación temporal            | 8         |
| III.2. Interpolación espacial            | 10        |
| <b>IV. Resultados y discusiones</b>      | <b>12</b> |
| IV.1. Estadística básica                 | 12        |
| IV.1.1. Variabilidad temporal de Chl-a   | 12        |
| IV.1.2. Variabilidad temporal de TDA     | 14        |
| IV.2. Estadística de remolinos           | 17        |
| IV.3. Remolinos y el transporte de Chl-a | 21        |
| IV.4. Análisis espacial                  | 26        |
| <b>V. Conclusiones</b>                   | <b>30</b> |
| <b>VI. Referencias</b>                   | <b>34</b> |

## Índice de figuras

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <b>Pagina</b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Figura 1. Área de estudio con los rasgos geográficos y geológicos más importantes. El Golfo de Tehuantepec (GT) se localiza al sur del Golfo de México separado por el Istmo de Tehuantepec (IT), región donde la Sierra Madre del Sur presenta una discontinuidad de 40 Km y altura promedio de 200 m.                                                                                                                                                                                                                 | <b>5</b>      |
| Figura 2. En morado la serie de tiempo (2001-2007) de todas las imágenes del satélite Aviso con intervalos cada 7,3.5 y 1 días (d), en azul las imágenes se encuentran separados cada 3.5 días. Para el satélite MODIS-Aqua se muestra la serie de tiempo (2002-2007) para todas las imágenes diarias en color naranja y en verde las imágenes separados cada 3.5 días. Finalmente las imágenes de ambos satélites coinciden temporalmente a partir del 6 de Julio de 2002 y finalizan el 23 de Octubre de 2007 (rojo). | <b>10</b>     |
| Figura 3. En azul los 553 arreglos bidimensionales de TDA con resolución espacial de 1080x915. En verde se muestra la matriz de Chl-a con resolución espacial de 903x601 que interpolados linealmente a la matriz de TDA obtienen un arreglo de 49 x146 (color rojo). Geográficamente esta matriz cubre las latitudes 8° - 18° N y longitudes 235° - 275° W.                                                                                                                                                            | <b>11</b>     |
| Figura 4. Media temporal de Chl-a expresada en $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ para el periodo del 6 de Julio del 2002 al 23 de Octubre de 2007.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>13</b>     |
| Figura 5. RCM de Chl-a expresada en $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , para el periodo del 6 de Julio de 2002 al 23 de Octubre de 2008.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | <b>14</b>     |
| Figura 6. Media de la TDA expresada en metros, para el mismo periodo de las figuras 4 y 5 (2002-2007).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <b>15</b>     |

|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 7.  | RCM de TDA expresada en metros, para el periodo Jul-2002-Oct-2007.                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 16 |
| Figura 8.  | Número de remolinos observados por primera vez para cada uno de los meses durante el periodo de estudio Jul-2002-Oct-2007.                                                                                                                                                                                                                                        | 18 |
| Figura 9.  | Histograma de la densidad temporal de remolinos para el periodo de estudio Jul-2002-Oct-2007. Las barras negras indican la densidad mensual de remolinos anticiclónicos mientras que las barras en color azul indican la densidad mensual de remolinos ciclónicos. La barra roja es la suma de densidades ciclónicas y anticiclónicas para cada uno de los meses. | 20 |
| Figura 10. | RCM de TDA en color expresada en m. Los puntos blancos representan remolinos ciclónicos y los puntos negros a los anticiclónicos. Mismo periodo de estudio (2002-2007).                                                                                                                                                                                           | 21 |
| Figura 11. | Coeficiente de correlación ( $r$ ) entre la topografía dinámica absoluta (TDA) y Clorofila-a (Chl-a) expresada como $r_{TDA-Chl-a}$ , para el periodo Jul-2002-Oct-2007. En rojo una franja zonal de $r_{TDA-Chl-a}$ positivas y en azul una franja zonal de $r_{TDA-Chl-a}$ negativas.                                                                           | 22 |
| Figura 12. | Coeficiente de correlación entre TDA y Chl-a, con una superposición de remolinos ciclónicos y anticiclónicos (blanco y negro) para el periodo 2002-2007.                                                                                                                                                                                                          | 24 |
| Figura 13. | Coeficiente de correlación estacional de TDA y Chl-a durante Jul-2002-Oct-2007.                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 25 |
| Figura 14. | Media de Chl-a (color) en $mg \cdot m^{-3}$ y media de TDA expresada en $ms^{-1}$ (contornos espaciados 0.03), para el periodo del 6 de Julio de 2002 al 23 de octubre de 2007.                                                                                                                                                                                   | 26 |

- Figura 15. Media de Chl-a (color) en  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , y RCM de TDA expresada en m(contornos espaciados 0.01), para el mismo periodo de la figura 14. **27**
- Figura 16. La RCM de Chl-a (color) en  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  y RCM de TDA expresada en m(contornos espaciados 0.01), para el periodo Julio - 2002 - Octubre - 2007. **28**
- Figura 17. RCM de Chl a (color) en  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , y Media de TDA expresada en m (contornos espaciados 0.03), para el periodo del 6 de Julio de 2002 al 23 de Octubre de 2007. **29**

## **I. Introducción**

El Golfo de Tehuantepec (GT) ha sido objeto de varias estimaciones relacionadas con la productividad primaria de fitoplancton a través de la concentración de clorofila *a* (Chl *a*) mediante imágenes de satélite (Lluch et al., 1997, Aguirre-Gómez y Salmerón-García, 1998, McClain et al., 2002) y cruceros oceanográficos (Lara-Lara y Bazán-Guzmán, 2005). La importancia de cuantificar el fitoplancton es fundamental dado que son los productores primarios más importantes en un ecosistema terrestre o marino (Barocio et al., 2007), ya que sirve de alimento a organismos como el zooplancton que a su vez alimenta a varias especies de peces y así hasta llegar a los consumidores terciarios.

La dinámica del viento en la zona del GT también ha sido objeto de estudio por diversos investigadores (Müller y Fuentes, 2000, Romero-Centeno et al., 2003, Zamudio et al., 2006, Trasviña et al., 2008). El viento proveniente del Golfo de México es canalizado a través de un paso de montaña de apenas 40 km de ancho, creando un chorro de viento que sale perpendicular a la costa, lo que genera afloramientos ricos en nutrientes que se depositan en la capa superficial del océano. Estos vientos también son responsables de la formación de algunos remolinos de mesoescala en la región de él GT. Algunos remolinos pueden ser originados por inestabilidades de corrientes (McClain et al., 2002) o algún otro mecanismo.

El trayecto de los remolinos produce variabilidad en la superficie del mar que puede ser estudiada mediante el uso de imágenes satelitales, como los que proporciona el producto AVISO. Los remolinos además pueden atrapar y transportar Chl-a. Este pigmento es detectado por algunos satélites, como el MODIS-Aqua.

En este trabajo se analizó la relación entre la concentración de Chl-a, la altura dinámica del mar y las estructuras de mesoescala que se forman en la región del Pacífico Tropical Oriental con énfasis en el GT y GP.

### **1.1. Antecedentes**

La variabilidad del nivel del mar en el Pacífico Tropical Oriental fue estudiada por Giese et al. (1994) mediante imágenes del satélite TOPEX. El periodo de estudio inicio en Enero de 1992 y finalizó en Diciembre de 1993. En este estudio encontraron dos zonas de interés ubicadas en  $5^{\circ}$ - $7^{\circ}$  N,  $160^{\circ}$   $140^{\circ}$  W y otra que se extiende hacia la costa de América central  $10^{\circ}$ - $12^{\circ}$ N,  $120^{\circ}$ W. Los cambios en el nivel del mar en la región ubicada en  $5^{\circ}$ - $7^{\circ}$  N,  $160^{\circ}$ -  $140^{\circ}$  W fue de unos 8 cm mientras que la zona de  $10^{\circ}$ - $12^{\circ}$ N y  $120^{\circ}$ W puede exceder los 10 cm.

Algunas características asociadas a la vida de remolinos (ciclónicos y anticiclónicos) próximos al GT y GP fueron documentadas por Palacios y Brogad (2005). Ellos usaron series de tiempo de altimetría obtenidas por imagen satelital durante el periodo 1992-2002. Realizaron un censo de

remolinos formados en los golfos de Tehuantepec y Papagayo. Observaron un total de 42 remolinos generados en el GT y 26 en el GP durante ese periodo, registraron 16 fusiones de remolinos provenientes de ambos golfos. En la época de vientos, el promedio anual de remolinos en el GT y GP fue de 3.5 y 2.2 respectivamente. La vida mínima promedio de estos remolinos es de 84 días para los de Papagayo y 143 días para los de Tehuantepec. Hay que mencionar que durante este periodo de estudio, ocurrieron los fenómenos de *él niño* (1997-1998) y la *niña* (1995-1996, 1998-2002), que modificaron tanto la intensidad, la cantidad y la duración de estos remolinos.

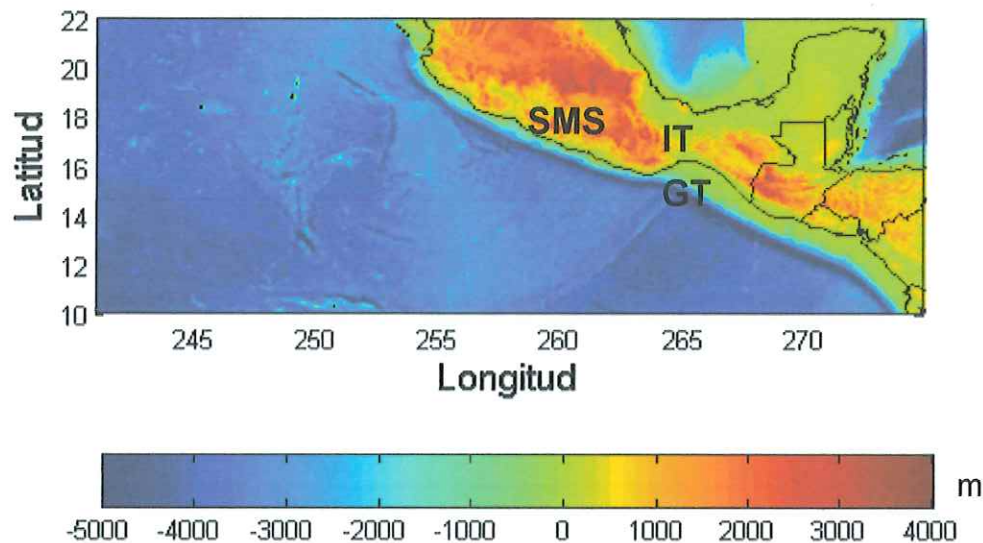
Los remolinos anticiclónicos pueden tener una vida de hasta seis meses antes de disiparse (Hansen y Maul, 1991), alcanzan una distancia fuera de la costa superior a 1500 km (Müller-Karger y Fuentes-Yaco, 2000) y son más numerosos que los remolinos ciclónicos (González-Silvera et al., 2004).

En lo que concierne a la variable biológica de Chl-a, pocos son los estudios que hacen estimaciones de la concentración de clorofila en el GT. Aguirre y Salmerón utilizaron imágenes de color del mar obtenidas mediante el satélite SeaWiFS en el periodo de 1998-2004. El área de estudio abarcó las costas de la República Mexicana desde Jalisco hasta Chiapas. En la zona del GT, el promedio de las imágenes que corresponden a los inviernos, registraron altas concentraciones de clorofila entre los 1.5 y los 2 mg-m<sup>-3</sup>.

Lara y Bazán presentaron por primera vez estimaciones sobre la distribución y producción del fitoplancton por tamaño, desde la boca del Golfo de California hasta el GT. Este trabajo fue realizado a bordo del Buque Oceanográfico "El puma". Las muestras se obtuvieron del 15 de enero al 4 de febrero de 1999, y se registraron concentraciones de Chl-a máximas a  $2.06 \text{ mg-m}^{-3}$ . La profundidad de la zona eufótica fue de aproximadamente 48 m. Estos valores tan altos en Chl-a y la extensión que pueden llegar a tener (400 km hacia mar abierto) hacen del GT una zona única en la República Mexicana, de ahí el gran interés físico, biológico y pesquero-industrial.

## **1.2. Zona de estudio**

La plataforma continental del **Golfo de Tehuantepec** (GT) pertenece a la región oceanográfica del Pacífico Tropical Oriental, limita al este con el Río Suchiate en Chiapas, al oeste con Puerto Ángel y al sur del Istmo de Tehuantepec (IT) en el estado de Oaxaca (Fig. 1). En el IT la Sierra Madre del Sur (SMS) con elevaciones típicas de 2000 m se ve interrumpida por un paso de 40 km de ancho y altura promedio de 200 m, conocido como "Paso de Chivela".



**Figura 1.** Área de estudio con los rasgos geográficos y geológicos más importantes. El Golfo de Tehuantepec (GT) se localiza al sur del Golfo de México separado por el Istmo de Tehuantepec (IT), región donde la Sierra Madre del Sur presenta una discontinuidad de 40 Km y altura promedio de 200 m.

Durante los meses de noviembre a febrero el GT es sometido a fuertes vientos de “paso de montaña” que soplan perpendiculares a la costa. Estos vientos son generados cuando existe una alta presión atmosférica en el Golfo de México proveniente del Norte de América, que interactúa con las masas de aire de baja presión del Pacífico, produciendo un gradiente de presión que viaja por el “Paso de Chivela”. El chorro de aire generado, viaja hacia el océano Pacífico en una dirección perpendicular a la costa, alcanzando extensiones de más de 400 km hacia mar abierto. Los eventos de vientos conocidos como “Nortes” o “Tehuano”, tienen duraciones de tres a cuatro días con velocidades promedio entre  $10$  y  $20 \text{ ms}^{-1}$ , con algunas rachas superiores a los  $25 \text{ ms}^{-1}$  (Barton, 1993). Los vientos de paso de montaña también pueden observarse en

el Golfo de Papagayo (GP), ubicado en las costas de Nicaragua, y en los Nortes del Golfo de Panamá (Trasviña et al., 1999).

El efecto de estos fuertes vientos en el océano producen surgencias (McCreary et al. 1989), que proporcionan grandes cantidades de nutrientes a la región del GT (Lara-Lara et al. 2005). También pueden provocar procesos de mesoescala como remolinos que se desplazan en dirección suroeste, con diámetros entre los 200 km (Trasviña et al., 2002) se ha observado que estos remolinos pueden persistir durante meses (Palacios y Brogad., 2005).

## **II. Objetivo**

Analizar la relación entre la variabilidad en la altura dinámica del océano y la abundancia de fitoplancton, medidas a través de la topografía dinámica absoluta y la concentración de clorofila a en la región del Pacífico Tropical Oriental, mediante el uso de imágenes satelitales.

### III. Metodología

Para analizar la relación entre la altura dinámica del océano y la concentración de fitoplancton, se utilizaron datos de distintos satélites. Primero se obtuvieron los datos de topografía dinámica absoluta (TDA) proporcionados por el producto AVISO en la dirección de internet:

<ftp://ftp.cls.fr/pub/oceano/AVISO/SSH/duacs/global/nrt/madt/merged/h/>

La abundancia de fitoplancton en el océano es medida a través de la concentración de clorofila *a* (Chl-*a*). El satélite MODIS-Aqua proporcionó las imágenes de Chl-*a* en su página de internet

<http://modis.gsfc.nasa.gov/>

AVISO y MODIS-Aqua empezaron a recabar datos en distinta fecha y con diferente resolución espacial, de tal forma que no coinciden en tiempo y espacio. A continuación se muestra la interpolación temporal y espacial para los datos de Chl-*a* y TDA.

#### III.1. Interpolación temporal

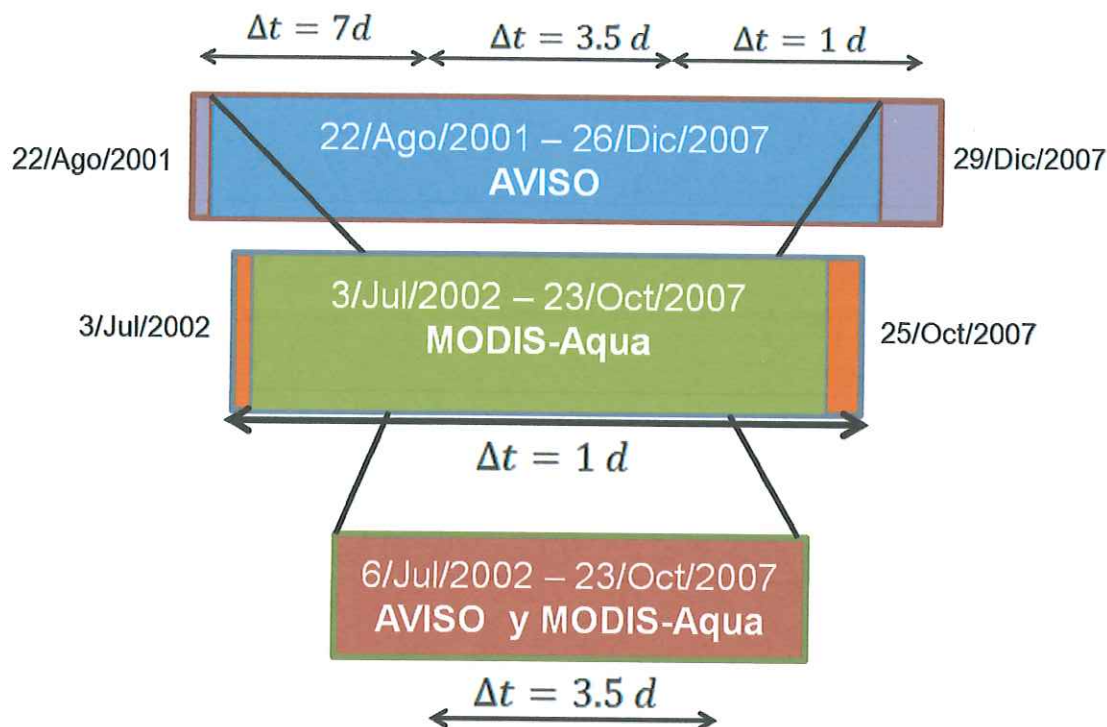
Se conoce como **interpolación** al cálculo aproximado de una función  $y = f(x)$ , utilizando algunos valores funcionales conocidos, por ejemplo:

$y_1 = f(x_1)$ ,  $y_2 = f(x_2)$ , ...,  $y_n = f(x_n)$  para aquellos valores  $x$  situados entre los valores  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

El producto AVISO inició el 22 de agosto de 2001 y cuenta con un último dato fechado el 29 de Diciembre de 2007. El número de valores funcionales conocidos para AVISO fueron 973 imágenes (con intervalos de 7, 3.5 y 1 día), al ser interpolados linealmente en intervalos de 3.5 días, se obtuvo un arreglo con un tamaño de 663 imágenes. El primer dato del nuevo arreglo se ubica el día 22 de agosto de 2001 y finaliza el día 26 de diciembre de 2007.

La base de datos proporcionada por el satélite MODIS-Aqua inició el 3 de Julio de 2002 y finalizó el 23 de octubre de 2007. Para MODIS-Aqua se tuvieron 1939 valores funcionales (imágenes), que interpolados linealmente en intervalos de 3.5 días crearon una base de datos de 554 imágenes. La primera imagen de la nueva base de datos inicio el 5 de Julio de 2002 y concluyó el día 25 de octubre de 2007.

Por último limitamos temporalmente las dos bases de datos (Chl-a y TDA) iniciando el 6 de Julio de 2002 y finalizando el 23 de octubre de 2007, obteniendo 553 imágenes (Fig.2)

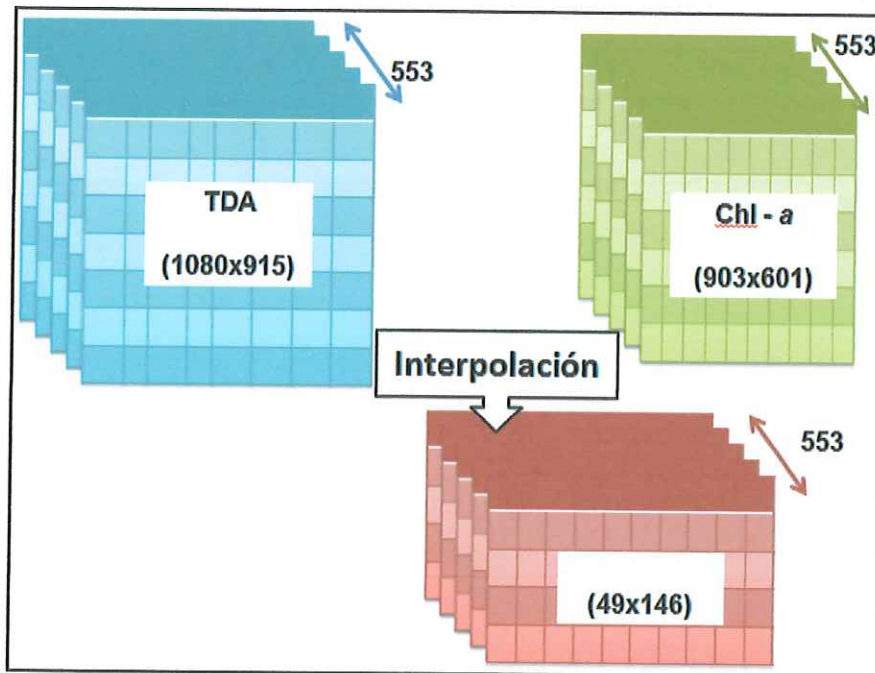


**Figura 2.** En morado la serie de tiempo (2001-2007) de todas las imágenes del satélite Aviso con intervalos cada 7,3.5 y 1 días (d), en azul las imágenes se encuentran separados cada 3.5 días. Para el satélite MODIS-Aqua se muestra la serie de tiempo (2002-2007) para todas las imágenes diarias en color naranja y en verde las imágenes separados cada 3.5 días. Finalmente las imágenes de ambos satélites coinciden temporalmente a partir del 6 de Julio de 2002 y finalizan el 23 de Octubre de 2007 (rojo).

### III.2. Interpolación espacial

Las dimensiones de las imágenes de TDA constan de un arreglo bidimensional de 1080 x 915 con resolución espacial de  $1/3^\circ \times 1/3^\circ$ . Las imágenes de Chl-a tienen dimensiones menores al arreglo de TDA con 903 x 601 y resolución espacial cada 4 km. Nuevamente se empleó el método de interpolación lineal para hacer coincidir en espacio los datos de Chl-a y TDA. El resultado fue un arreglo de 49 x 146 puntos espaciado cada  $1/3^\circ$  que cubre la

región geográfica entre los 237-275°N, 7-18°W localizada en el Pacífico Tropical Oriental. El tamaño del arreglo final fue una matriz de 49 x 146 x 553. (Fig. 3)



**Figura 3.** En azul los 553 arreglos bidimensionales de TDA con resolución espacial de 1080x915. En verde se muestra la matriz de Chl-a con resolución espacial de 903x601 que interpolados linealmente a la matriz de TDA obtienen un arreglo de 49 x146 (color rojo). Geográficamente esta matriz cubre las latitudes 8° - 18° N y longitudes 235° - 275° W.

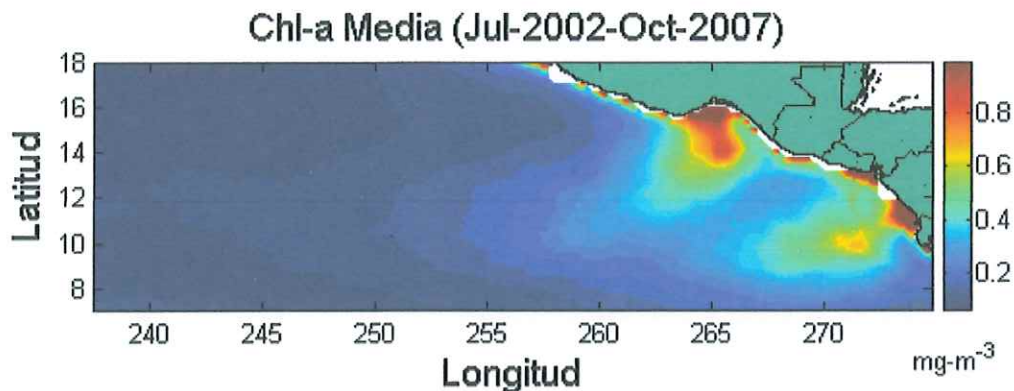
## **IV. Resultados y discusiones**

### **IV.1. Estadística básica**

#### **IV.1.1. Variabilidad temporal de Chl-a**

La media de clorofila *a* expresada en  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  para el periodo del 6 de Julio de 2002 al 23 de Octubre de 2007 muestra altas concentraciones de Chl-a ubicadas en las costas del GT y GP (Fig. 4). Estos valores altos en la media de Chl-a pueden extenderse hasta 500 Km hacia mar abierto. En ninguna otra parte del litoral mexicano altas concentraciones de Chl-a se extienden tan alejadas de la costa. Esta característica biológica del GT es atribuida a distintos mecanismos, entre ellos a mezcla turbulenta vertical bajo el eje del viento (Trasviña et. al. 1995) ó a surgencias costeras. Otro mecanismo puede atribuirse a los remolinos de mesoescala que se generan en el GT. El efecto de los remolinos puede ser a través de bombeo de nutrientes hacia la zona fótica, o transporte hacia mar afuera de aguas costeras ricas en clorofila. Debido a la importancia que tienen las concentraciones de Chl-a ( $>1\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), el GT es una zona de gran interés biológico, pesquero-industrial, y por supuesto oceanográfico.

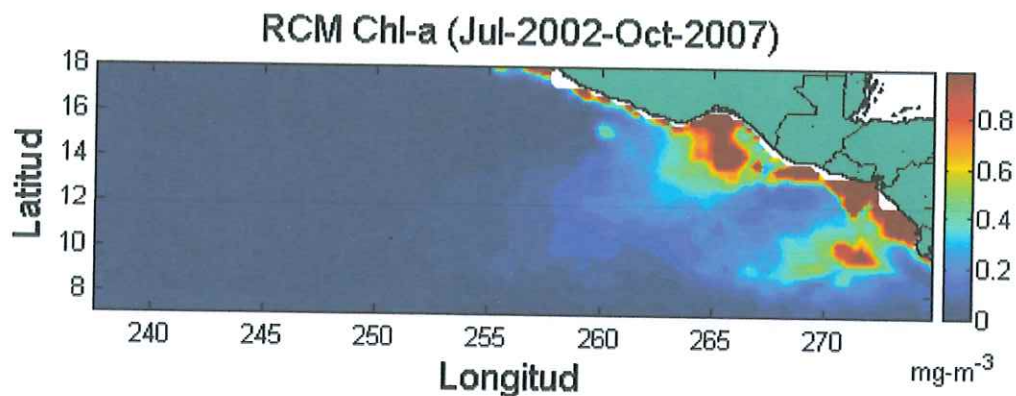
Lejos de la costa del GP también se observa alta concentración de Chl-a, ubicado en la cercanía del llamado Domo de Costa Rica (DCR). La presencia de alta concentración de Chl-a en el DCR también fue observada por Wooster y Cromwell (1958).



**Figura 4.** Media temporal de Chl-a expresada en  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  para el periodo del 6 de Julio del 2002 al 23 de Octubre de 2007.

La raíz cuadrática media (RCM) de Chl-a (Fig. 5), indica una alta fluctuación de clorofila desde la costa del GT hasta Costa Rica, con valores iguales o mayores a la media. Los altos valores en la media de Chl-a (Fig. 4) y la alta variabilidad implican que la concentración de Chl-a en la región del GT no son permanentes pero si son significativas. Hay que resaltar la alta concentración de Chl-a en la zona de él GT y GP que puede llegar a tener más de  $1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

La distribución de Chl-a mostradas en la media (Fig. 4) y RCM (Fig. 5), como ya se mencionó, es anómala a la costa del Pacífico Mexicano. A continuación intentaremos mostrar la influencia de los remolinos en la distribución de Chl-a en la zona del GT.



**Figura 5.** RCM de Chl-a expresada en  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , para el periodo del 6 de Julio de 2002 al 23 de Octubre de 2008.

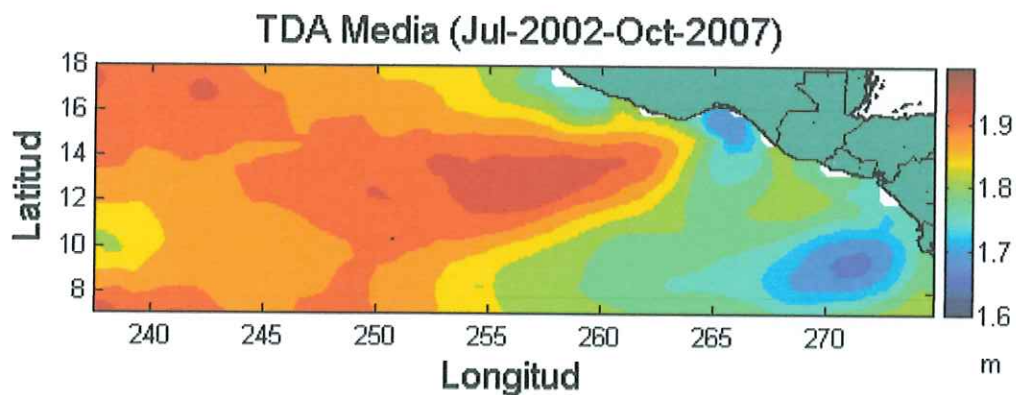
#### IV.1.2. Variabilidad temporal de TDA

La atmósfera modifica la superficie del océano a través de varios factores: forzamiento por viento, calentamiento solar, precipitación, centros de baja y alta presión entre otros. Uno de los principales factores atmosféricos en el GT son los eventos de viento "Nortes" ó "Tehuano". Los Nortes tienen una duración típica de tres a cuatro días con vientos mayores a  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Estos vientos tan intensos originan un descenso del nivel del mar en la cabeza del GT. La relación del nivel del mar con eventos de Tehuanos ha sido estudiada por Christensen et al. (1983) como por Enfield y Allen (1983), ellos encontraron que después de un evento hay una caída del nivel del mar que puede alcanzar los 30 cm.

La media de TDA (Fig. 6) calculada para el mismo periodo utilizado en el análisis de Chl-a muestra una zona de valores máximos ubicada al SW de Tehuantepec. El máximo relativo se puede ubicar en  $11^{\circ}\text{-}13^{\circ} \text{ N}$ ,  $254^{\circ}\text{-}260^{\circ} \text{ W}$  y

decrece conforme se acerca hacia el GT. Justo en la cabeza del golfo se forma un mínimo relativo que abarca 150 km de ancho. A primera vista, la región aledaña al GT con bajos valores de TDA, coincide geográficamente con las zonas de altos valores en la media y RCM de Chl-a.

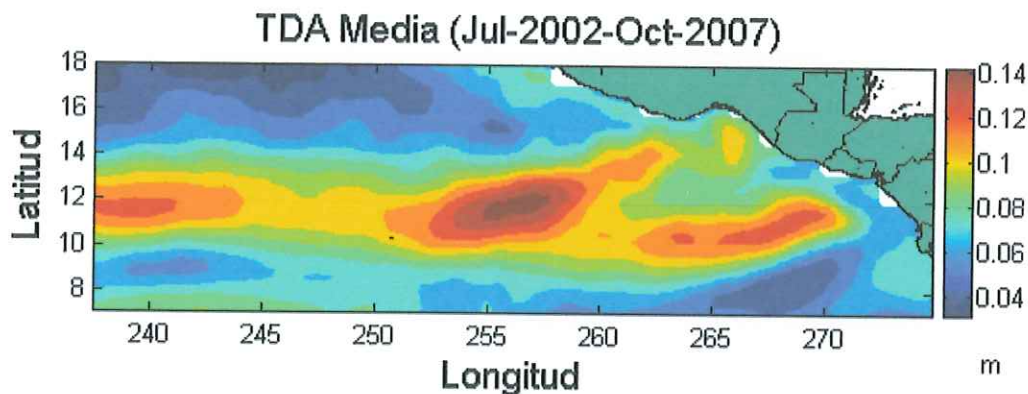
Al occidente del GP se encuentra otro mínimo en la media de TDA. Este mínimo parece estar asociado al DCR, que es un remolino ciclónico con un diámetro que varía entre los 200 y 500 km. Su centro se ubica aproximadamente en 9° N - 272° W. En un principio se tenía la hipótesis de que el domo era permanente y estacionario pero algunos estudios sugieren que solo se forma de mayo a octubre (Hofmann *et al.*, 1981).



**Figura 6.** Media de la TDA expresada en metros, para el mismo periodo de las figuras 4 y 5 (2002-2007).

La zona de alta variabilidad en la TDA (Fig. 7) se extiende hacia el Oeste y está rodeada al Norte y Sur por zonas de baja variabilidad. La franja zonal máxima centrada en 12° N - 256° W se bifurca y decrece hacia las costas del

GT y GP. La zona de máxima variabilidad puede ser atribuida a varios factores, entre ellos el efecto de los muy abundantes remolinos que se generan tanto en los golfos de Tehuantepec y Papagayo, y que al desplazarse hacia el Oeste coinciden en esta zona. Estos remolinos pueden ser formados por viento (McCreary et al., 1989) o por ondas atrapadas a la costa (Zamudio et al., 2006), o incluso por inestabilidades de corrientes.



**Figura 7.** RCM de TDA expresada en metros, para el periodo Jul-2002-Oct-2007.

Los remolinos anticiclónicos se caracterizan por rotar a favor de las manecillas del reloj. Al ser afectados por la rotación terrestre (Coriolis) las corrientes producidas (en sentido anticiclónico) están asociadas con una elevación en el nivel del mar. El gradiente de la fuerza de presión producido por la elevación en el nivel del mar está en balance con la fuerza de Coriolis (Balance Geostrófico). Los remolinos anticiclónicos también son conocidos como remolinos cálidos debido al efecto del hundimiento en la estructura vertical de las isopícnas. En los remolinos ciclónicos geostroáficos ocurre lo contrario: giran en contra de las manecillas del reloj, produciendo una depresión

de la superficie del océano y levantamiento en el interior, por lo que son llamados remolinos fríos.

La relación entre la presencia de remolinos con la alta variabilidad de TDA será analizada más adelante, sin embargo, nuestra interpretación de la alta variabilidad en la TDA, es que es ocasionada por el paso de los remolinos generados en el GT y GP al trasladarse hacia el Oeste.

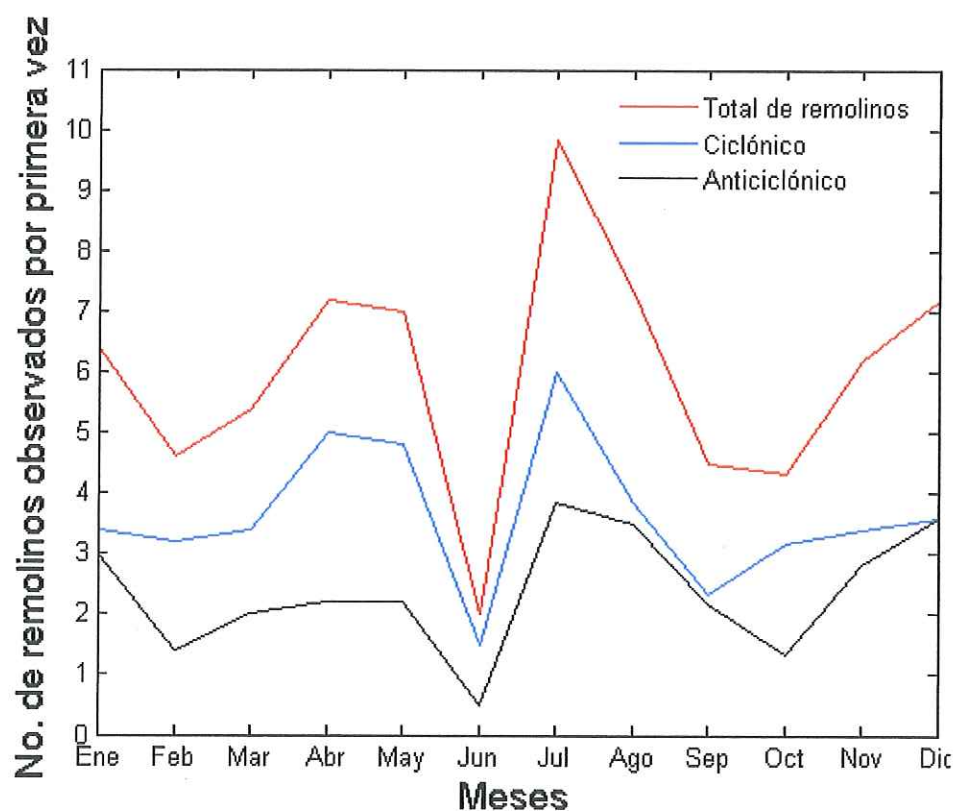
#### **IV.2. Estadística de remolinos**

En este trabajo se realizó un análisis cuantitativo de remolinos observados en la región del Océano Pacífico Tropical Oriental durante el periodo 2002-2007.

Para identificar los remolinos en cada mes se determinó visualmente la presencia de estructuras circulares donde aumenta o disminuye su amplitud más de 10 cm. Hay que mencionar que no todos los remolinos son originados en el GT y GP ya que algunos son identificados por primera vez en mar abierto. El inicio de cada remolino es la fecha del primer avistamiento, estos remolinos se siguieron de forma individual hasta su desaparición.

La figura 8 muestra la cantidad de remolinos observados por primera vez durante cada mes. Como se puede ver, el mes de menor generación de remolinos fue durante el mes de Junio que precede al mes de máxima generación que fue Julio. Al parecer la zona del Pacífico Tropical Oriental se ve influenciado por algún mecanismo que no favorece la formación de ambos tipos

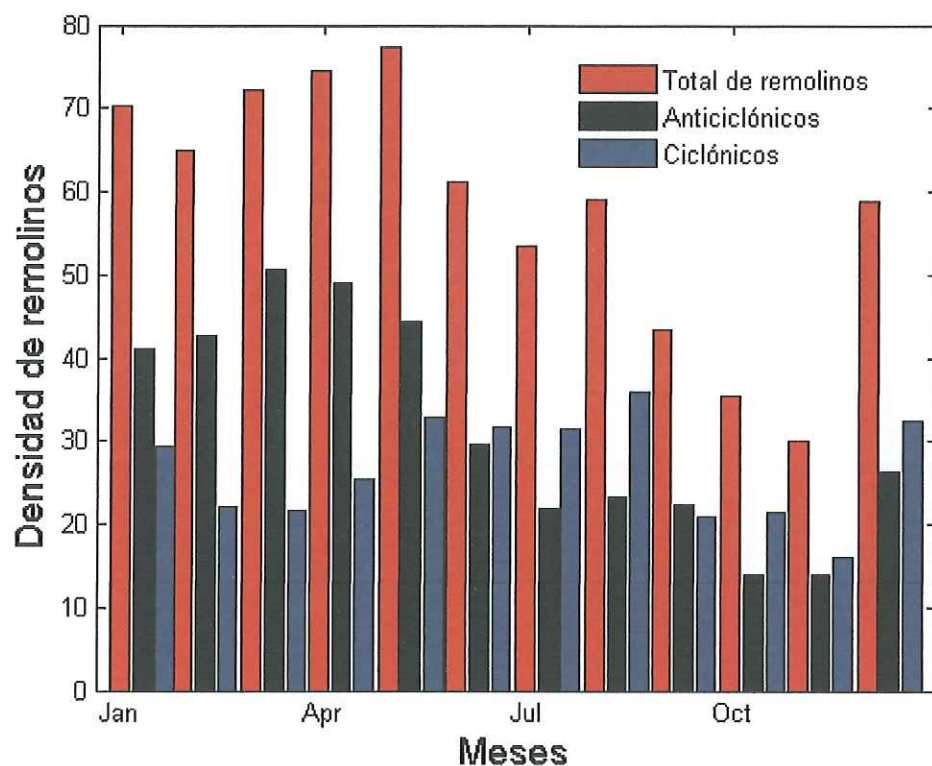
de remolinos durante Junio, cambiando drásticamente el panorama en Julio, época del año en donde existe una mayor presencia de remolinos. Durante todo el año el número de observaciones ciclónicas (235) siempre es mayor a las observaciones de remolinos anticiclónicos (154).



**Figura 8.** Número de remolinos observados por primera vez para cada uno de los meses durante el periodo de estudio Jul-2002-Oct-2007.

El total de avistamientos de remolinos para el periodo de estudio (2002-2007) se muestra en la figura 9. La temporada más abundante de remolinos comprende los meses de Diciembre hasta Mayo. El mes de máximas observaciones fue durante Mayo con un total de 77 estructuras, de las cuales 41 fueron anticiclónicas y 36 ciclónicas. Para ambas estructuras, el mes de menor observación fue Noviembre con 13 anticiclónicos y 14 ciclónicos.

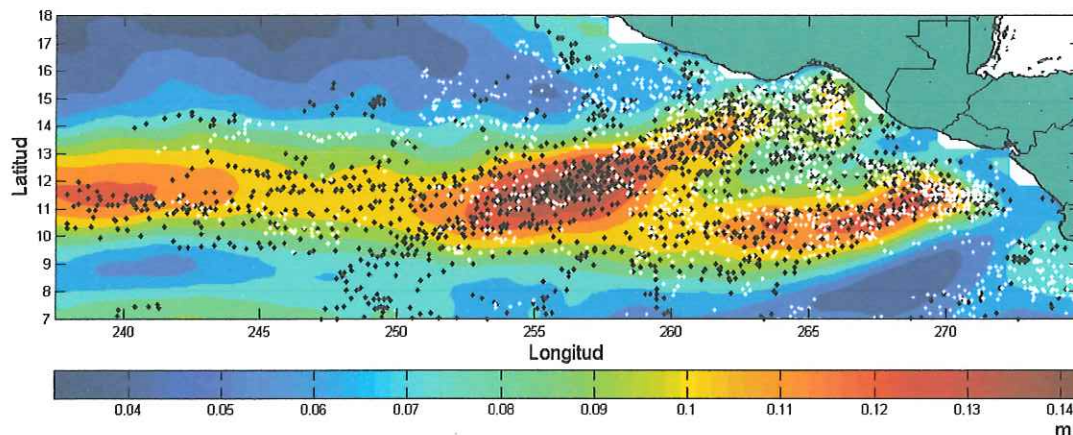
Los meses de mayor observación de remolinos anticiclónicos fueron Marzo y Abril con 50 y 49 estructuras de mesoescala, mientras que los meses de Agosto se observaron una mayor cantidad de remolinos ciclónicos con un total de 36 estructuras. Entonces es posible etiquetar a las estaciones de invierno y primavera con mayor actividad de remolinos anticiclónicos mientras que el verano y otoño con mayor presencia de remolinos ciclónicos.



**Figura 9.** Histograma de la densidad temporal de remolinos para el periodo de estudio Jul-2002-Oct-2007. Las barras negras indican la densidad mensual de remolinos anticiclónicos mientras que las barras en color azul indican la densidad mensual de remolinos ciclónicos. La barra roja es la suma de densidades ciclónicas y anticiclónicas para cada uno de los meses.

La figura 10 muestra el centro de todos los remolinos observados durante el periodo de estudio. Los puntos blancos representan remolinos ciclónicos y los puntos negros anticiclónicos. Para ver la relación entre la TDA y los remolinos de mesoescala, en la misma figura se muestra en color la RCM de la TDA (ver Fig. 7). Se puede observar un cúmulo de remolinos ciclónicos y anticiclónicos en las inmediaciones del GT. Al parecer estos remolinos tienen una dirección preferencial de viajar hacia el suroeste. Cerca de las costas del GP también existe un cúmulo de remolinos ciclónicos. Los remolinos originados en este

golfo tienden a viajar hacia el noroeste. Durante el periodo de estudios se registraron muy pocos remolinos anticiclónicos en la región del GP. En general los remolinos de ambos golfos prefieren viajar en la franja zonal de alta variabilidad de TDA.



**Figura 10.** RCM de TDA en color expresada en m. Los puntos blancos representan remolinos ciclónicos y los puntos negros a los anticiclónicos. Mismo periodo de estudio (2002-2007).

### IV.3. Remolinos y el transporte de Chl-a

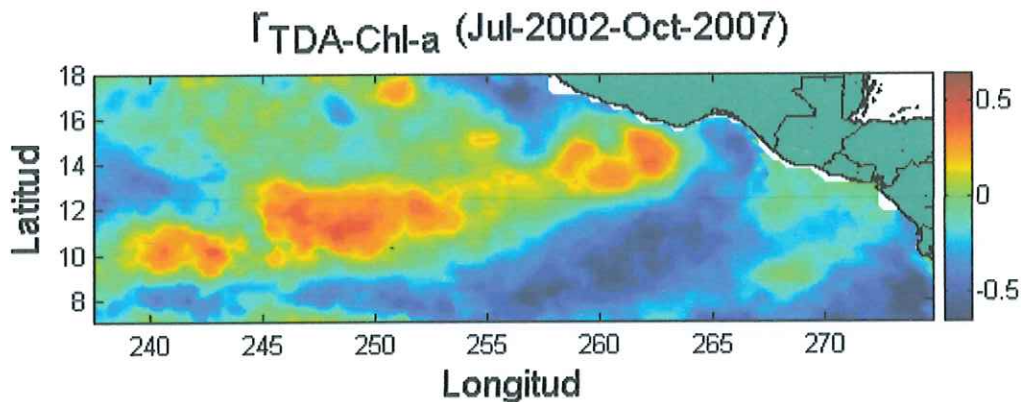
Para determinar si entre los datos de TDA y Chl-a existe alguna relación, se calculó el coeficiente de correlación denotado por la letra  $r$ . El coeficiente de correlación  $r$ , es un número adimensional que mide la relación lineal entre dos variables cuantitativas. El valor de  $r$  se encuentra en el intervalo cerrado  $[-1,1]$ . Los posibles escenarios de correlación son:

Si  $r=0$ , no existe correlación lineal entre las variables.

Si  $r > 0$ , la correlación lineal es positiva, si una de las variables aumenta o disminuye la otra también lo hace.

Si  $r < 0$  la correlación lineal es negativa, si una de las variables aumenta la otra disminuye.

La figura 11 muestra el coeficiente de correlación de TDA con Chl-a para el periodo de estudio de 5 años denotado como  $r_{TDA\_Chl-a}$ . La  $r_{TDA\_Chl-a}$  positiva se observa como una franja zonal en color rojo. Los máximos valores se encuentran hacia el suroeste del GT y la zona ubicada entre  $10^{\circ}$ - $12^{\circ}$  N,  $245^{\circ}$ - $254^{\circ}$  W.



**Figura 11.** Coeficiente de correlación ( $r$ ) entre la topografía dinámica absoluta (TDA) y Clorofila-a (Chl-a) expresada como  $r_{TDA\_Chl-a}$ , para el periodo Jul-2002-Oct-2007. En rojo una franja zonal de  $r_{TDA\_Chl-a}$  positivas y en azul una franja zonal de  $r_{TDA\_Chl-a}$  negativas.

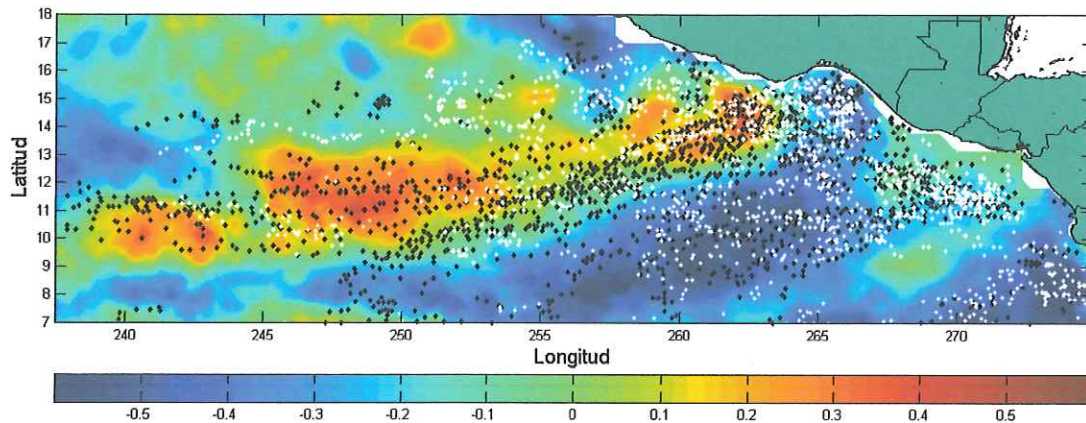
La zona de altos valores en  $r_{TDA\_Chl-a}$  coincide con la región de máximos relativos en la RCM de TDA observados en la figura 7. Los valores de  $r_{TDA\_Chl-a}$  negativos se ubican al sur de la franja zonal de  $r_{TDA\_Chl-a}$  positivas. Como era de esperarse cerca de las costas de Tehuantepec y Papagayo existe una  $r_{TDA\_Chl-a}$ ,

negativa, ya que una disminución en el nivel del mar aledaño a los golfos (Fig. 6) coincide con afloramientos ricos en nutrientes (Fig. 4). Sin embargo esto no explica porque existe correlación entre los datos de TDA y Chl-a hacia fuera de la costa.

Para establecer algún tipo de relación de  $r_{TDA\_Chl-a}$  con las estructuras de mesoescala se sobrepuso a la figura 11 todos los remolinos observados durante el periodo de estudio (Fig. 12).

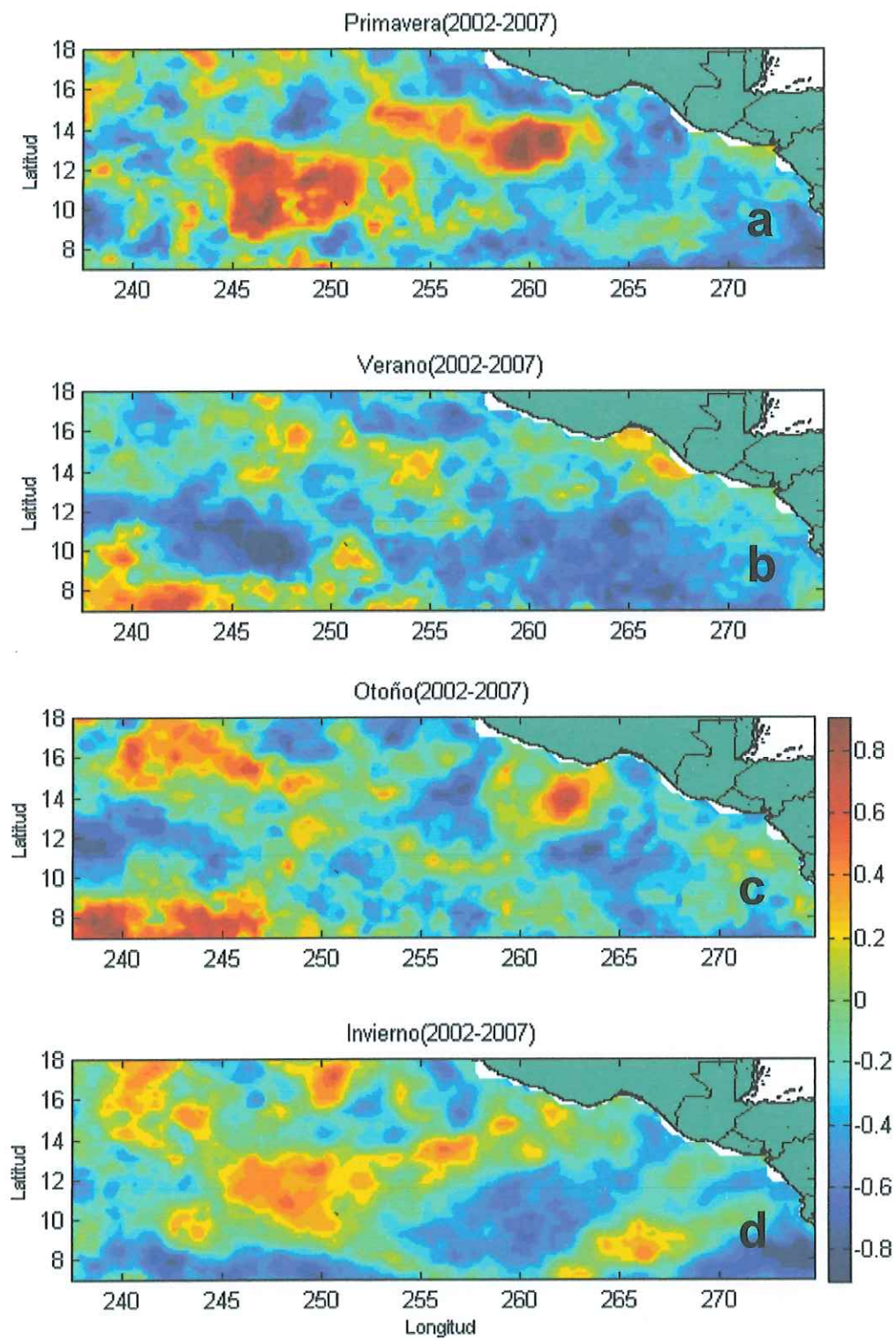
Los escenarios dominantes que observados en la región del Pacífico Tropical oriental fueron los siguientes: Una zona de correlación positiva que coincide con la mayor presencia de remolinos anticiclónicos (puntos en negro) y una correlación negativa asociada a remolinos ciclónicos (puntos en blanco)

Este resultado es significativo ya que ambos remolinos contienen altas concentraciones de Chl-a, lo que contradice la idea de que solo los remolinos ciclónicos son capaces de bombear nutrientes hacia la superficie. Esto sugiere que el mecanismo por el cual existen altas concentraciones de Chl-a en la zona de estudio, se deba en su mayoría a transporte de nutrientes.



**Figura 12.** Coeficiente de correlación entre TDA y Chl-a, con una superposición de remolinos ciclónicos y anticiclónicos (blanco y negro) para el periodo 2002-2007.

A continuación en la figura 13 se muestran la  $r_{TDA\_Chl-a}$  por estación durante el periodo del 6 de Julio de 2002 al 23 de Octubre de 2007. Durante la primavera (marzo-mayo) se obtuvo el máximo valor para la  $r_{TDA\_Chl-a}$  negativa y positiva con valores de  $-0.8 < r_{TDA\_Chl-a} < 0.9$ . Estas correlaciones son significativas para la zona del Pacífico Tropical Oriental muy probable por la abundante presencia de remolinos anticiclónicos para el mes de marzo (ver Fig. 9).

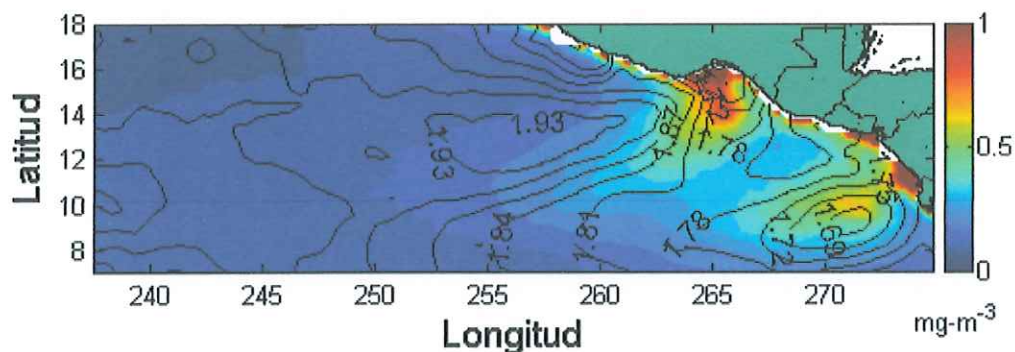


**Figura 13.** Coeficiente de correlación estacional de TDA y Chl-a durante Jul-2002-Oct-2007.

#### IV.4. Análisis espacial

Después de realizar el análisis temporal con los datos de clorofila-a, topografía dinámica absoluta, se compararan espacialmente para ver si existe alguna dependencia en su distribución espacial.

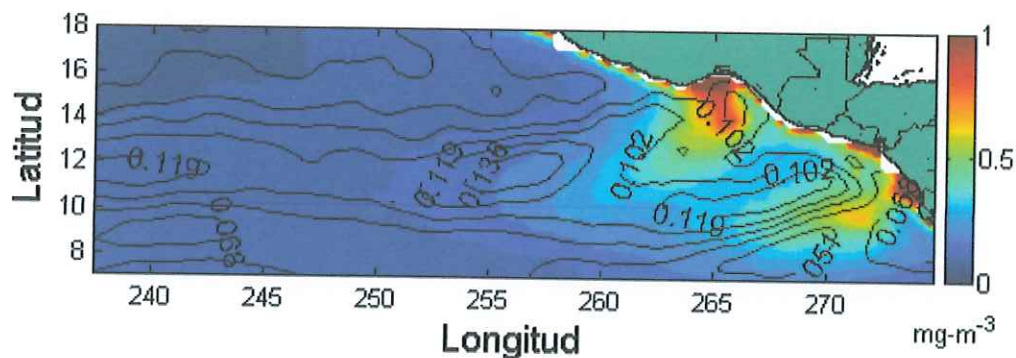
Primero se analizara la imagen de clorofila media en color con los contornos en la media de topografía dinámica absoluta para el periodo de estudio 2002-2007. En la figura 14 se muestra un mínimo en los contornos de TDA ubicado en la cabeza del GT, según Leonard et al. (1996) desempeña un papel fundamental en la concentración de Chl-a, otra significativa concentración de Chl-a se encuentra cerca del DCR delimitada por una región que se caracteriza por aguas frías, salada y con un alto contenido de nitrato (McClain et., Al 2001).



**Figura 14.** Media de Chl-a (color) en  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  y media de TDA expresada en  $\text{ms}^{-1}$  (contornos espaciados 0.03), para el periodo del 6 de Julio de 2002 al 23 de octubre de 2007.

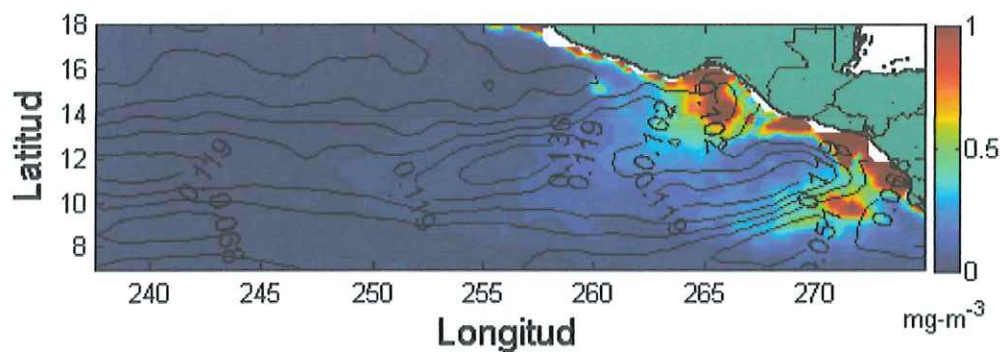
La siguiente figura corresponde a la media de clorofila en color y líneas de contorno de la RCM de TDA (Fig. 15). Es interesante observar el cambio tan drástico en los valores de los contornos al suroeste de Papagayo y al sur de Tehuantepec. Se observa que enfrente de papagayo la RCM de TDA no rebasa los 7 cm, mientras que en Tehuantepec la fluctuación de TDA está por los 10 cm aproximadamente. La variabilidad en Papagayo se ve influenciada evidentemente por remolinos ciclónicos mientras que la variabilidad en los 11°N-25°W tiene la forma de un remolino anticiclónico. Estos remolinos se propagan en consonancia con la característica de dispersión de ondas de Rosbby libres (Giese et al., 1994).

La variabilidad mayor a 10 cm localizada a la izquierda de la figura se debe a varios factores entre ellos los fuertes y dominantes vientos alisios.



**Figura 15.** Media de Chl-a (color) en  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , y RCM de TDA expresada en m(contornos espaciados 0.01), para el mismo período de la figura 14.

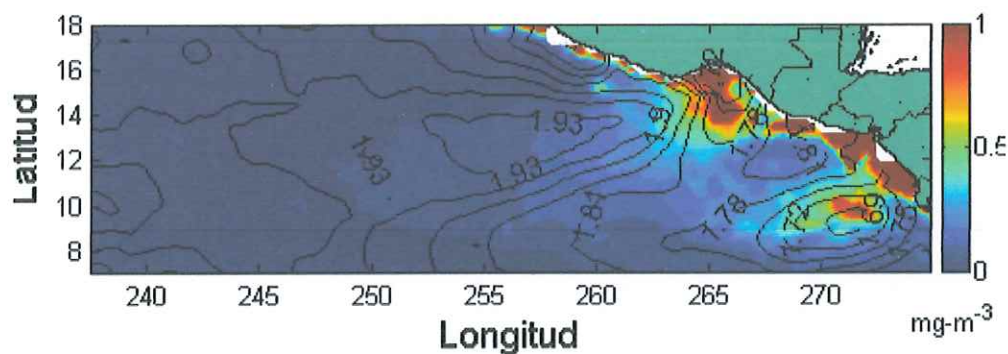
En la figura 16 la línea de contorno de la RCM de TDA ubicada al sur del GT envuelve a los máximos valores de la RCM de Chl-a. La variabilidad de TDA aumenta hacia el sureste del GT. Al oeste de papagayo se observa un cumulo de clorofila rodeado por tres zonas de contornos, dos mínimos, uno a la izquierda del cumulo y el otro a su derecha, al norte se localiza un máximo en los contornos de la RCM de TDA. Estas zonas de mínima y máxima variabilidad están posiblemente influenciadas por la presencia de remolinos de mesosescala. Se observa una preferencia al oeste del GP por los remolinos ciclónicos, mientras que en el GT se observan ciclónicos y anticiclónicos (Fig.9 ó Fig 11).



**Figura 16** .La RCM de Chl-a (color) en  $\text{mg-m}^{-3}$  y RCM de TDA expresada en m(contornos espaciados 0.01), para el periodo Julio - 2002 - Octubre - 2007.

Los contornos en la media de TDA sobre la imagen de la RCM de Chl-a (Fig.17) sugieren que para el GT las fluctuaciones en las concentraciones de clorofila son altas mayores a  $1 \text{ mg-m}^{-3}$ .

Para el DCR la RCM de Chl-a muestra que en su centro presenta alta variabilidad en las concentraciones de clorofila, pero no hay contornos significativos en la media de TDA, posiblemente a que este domo es un rasgo no permanente y por lo tanto se ve influenciado por los cambios en las estaciones del año.



**Figura 17.** RCM de Chl a (color) en  $\text{mg-m}^{-3}$ , y Media de TDA expresada en m (contornos espaciados 0.03), para el periodo del 6 de Julio de 2002 al 23 de Octubre de 2007.

## **V. Conclusiones**

Las imágenes de satélite utilizadas en este trabajo nos proporcionaron ideas para entender los fenómenos físicos y biológicos que suceden en el Pacífico Tropical Oriental.

Durante el periodo de estudio (de 2002 a 2007) en la zona al sur del GT y al oeste del GP se presentó un mínimo relativo en la topografía dinámica absoluta, posiblemente debido a los eventos de viento de paso de montaña que soplan normal a la costa (Fig.6). En el GT este mínimo coincide espacialmente con la región de alta concentración media de Chl-a (Fig. 14). La alta concentración de Chl-a tan alejada de la costa del GT no se aprecia en ninguna otra parte de la república mexicana.

Se localizó una franja zonal de máxima variabilidad de TDA (mayor a 10 cm) centrada en el 12°N-256°W, que se bifurca hacia el GT y GP (Fig .7). Las bandas de variabilidad posiblemente son generadas por los remolinos que se forman tanto en el GT como en el GP y que al desplazarse hacia el Oeste modifican la topografía dinámica del mar (Fig.10). Los altos valores en la franja zonal máxima también concuerdan con los estudios realizados por Giese et al (1994).

En este trabajo se registraron un total de 389 remolinos durante todo el periodo de estudio (Fig.8). El número de remolinos ciclónicos (235) siempre fue

mayor al de remolinos anticiclónicos (154). Las características más importantes que se observaron de estos remolinos son las siguientes: los remolinos ciclónicos fueron estructuras abundantes durante los meses de Julio a Diciembre pero de corta vida (entre 7 y 14 días). Estas estructuras ciclónicas tienen una preferencia de generarse al Este del GP y al Sur del GT. Los remolinos anticiclónicos son menos abundantes aunque más duraderos, su trayectoria suele ser muy estable y tienden a viajar al suroeste.

El cálculo de la correlación entre TDA y Chl-a ( $r_{TDA\_Chl-a}$ ) identificó dos franjas zonales de alta correlación en el Pacífico Tropical Oriental, una franja de correlación positiva alrededor de los  $8^{\circ}$ - $15^{\circ}$ ,  $240^{\circ}$ - $265^{\circ}$  y otra correlación negativa al sur de esta (Fig. 11). La  $r_{TDA\_Chl-a}$  es alta no solamente en la costa, sino que también en mar abierto presenta valores significativos. Nuestra interpretación de las altas correlaciones es que los remolinos son capaces de transportar Chl-a, independientemente de si son ciclónicos o anticiclónicos. La abundancia de remolinos anticiclónicos que viajan a través de la franja zonal de  $r_{TDA\_Chl-a}$  positiva es mayor que la de ciclónicos (Fig. 12). En base a lo anterior, la hipótesis de correlación positiva consiste en que la Chl-a está de acuerdo con los aumentos del nivel del mar (TDA) causados por el paso de remolinos anticiclónicos, y se superpone el escenario de  $r_{TDA\_Chl-a}$  positiva debido a decrementos en TDA y Chl-a. Por otra parte, la  $r_{TDA\_Chl-a}$  negativa coincide con el trayecto que siguen los remolinos ciclónicos, que dominan en número a los

anticiclónicos, y que también debe estar asociado a altas concentraciones de clorofila.

Estos resultados del análisis de correlación muestran ambos remolinos son capaces de transportar Chl-a y contradice la idea de que solamente los remolinos ciclónicos pueden estar relacionados con altas concentraciones de Chl-a.

Las correlaciones entre TDA y Chl-a por estación muestran que en Primavera existe una alta  $r_{TDA\_Chl-a}$  positiva (Fig. 13a) y no se aprecia algún valor significativa para  $r_{TDA\_Chl-a}$  negativa. Durante verano se observa  $r_{TDA\_Chl-a}$  positiva en la cabeza del GT (Fig. 13b), mientras que mar afuera se observa una predominancia de correlación positiva al norte de una franja (discontinua) de correlación negativa. Solo durante el verano se observa una correlación positiva en el GT. De la figura 8, se observa que el mínimo y máximo de remolinos generados ocurre durante verano, lo cual refleja un periodo de transición en el forzante (o forzantes) generador de remolinos durante esta época. También se observa que la  $r_{TDA\_Chl-a}$  negativa se está desplazando más hacia el noroeste. En otoño ya se aprecia una  $r_{TDA\_Chl-a}$  positiva al noroeste del GT y una  $r_{TDA\_Chl-a}$  negativa más al sur. Finalmente en invierno se observan las franjas zonales de  $r_{TDA\_Chl-a}$  positivas y negativas. En las estaciones de primavera e invierno las correlaciones son más notorias posiblemente

influenciadas por los intensos vientos generados en el GT y GP durante el periodo Noviembre-Mayo.

## VI. Referencias

- Aguirre-Gómez, R. y Salmerón-García, O. 2007. "Análisis de la variación del fitoplancton marino en el Pacífico Sur Mexicano mediante imágenes SeaWiFS de 1998 a 2004". Carbono en Ecosistemas Acuáticos de México. Editores Hernández de la Torre, Benigno y Gaxiola Castro, Gilberto. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT y Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, CICESE, 2007, 508 p. ISBN: 978-968-817-855-3.
- Barocio-León, O., Millán-Núñez, R., Santamaría del-Ángel, E., Gonzales-Silvera, A. 2007. Productividad primaria del fitoplancton en la zona eufótica del sistema de la corriente de California estimada mediante imágenes de CZCS. *Ciencias Marinas*. **33**:59–72.
- Barton, E.D., Argote, M.L., Brown, J., Kosro, P.M., Lavin, M., Robles, J.M., Smith, R.L., Trasviña, A., Vélez, H.S. 1993. Supersquirt: Dynamics of the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Oceanography*, 6, 23–30.
- Christense, N. Jr., De la Paz, R. y Gutiérrez, G. 1983. A study of sub-inertial waves of the west coast of Mexico. *Deep Sea Res.* 30, 835-850.
- Enfield, D.B. y Allen, J.S. 1983. The generation and propagation of sea level variability along the Pacific coast of Mexico. *J. Phys. Oceanogr.* 13: 1012-1033.
- Giese, B.S., Carton, J.A., Holl, L.J. 1994. Sea level variability in the eastern tropical Pacific as observed by TOPEX and Tropical Ocean-Global Atmosphere Tropical Atmosphere-Ocean Experiment. *Journal of Geophysical Research*. VOL. 99; ISSUE: C12 ; 24,739-24,748.
- González-Silvera, A., Santamaría-del-Ángel, E., Millán-Núñez, R., Manzo-Monroy, H. 2004. Satellite observations of mesoscale eddies in the Gulfs of Tehuantepec and Papagayo (Eastern Tropical Pacific). *Deep-Sea Res.*, Part II, 51(6–9): 587–600.
- Hansen, D.V. y Maul, G.A. 1991. Anticyclonic current rings in the eastern tropical Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.* 96(C4): 6965–6979.
- Hofmann, E.E., Busalacchi, A.J. y O'Brien, J.J. 1981. Wind generation of the Costa Rica dome. *Science*, 214: 552-553.
- Lara-Lara, J.R. y Bazán-Guzmán, C. 2005. Distribución de la clorofila y productividad primaria por clases de tamaño en la costa del Pacífico mexicano. *Ciencias Marinas*. **31**(1A): 11-21.

- Lluch-Cota, S.E., Álvarez-Borrego, S., Santamaría del-Ángel, E., Müller-Karger, F.E., Hernández-Vázquez, S. 1997. El Golfo de Tehuantepec y áreas adyacentes: Variación espacio-temporal de pigmentos fotosintéticos derivados de satélite. *Ciencias Marinas*. **23**: 329–340.
- Mc Creary, J.P., Lee H.S. y Enfield D.B. 1989. The response of the coastal ocean to strong offshore winds: with application to circulations in the Gulf of Tehuantepec and Papagayo. *Mar. Res.*, **47**, 81 – 109.
- McClain, C.R., Christian, J.R., Signorini, S.R., Lewis, M.R., Asanuma, I., Turk, D. y Dupouy, C. 2002. Satellite ocean color observations of the tropical Pacific Ocean. *Deep-Sea Research II*. **49**: 2533-2560.
- Müller-Karger, F.E. y Fuentes-Yaco, C. 2000. Characteristics of wind-generated rings in the eastern tropical Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research* **105**, 1271–1284.
- Palacios, D.M. y Brograd, J. 2005. A census of Tehuantepec and Papagayo eddies in the northeastern tropical Pacific. *Geophysical Research Letters*, **32**, L23606, doi: 10.1029/2005GL024324.
- Romero-Centeno, R., Zavala-Hidalgo, J., Gallegos, A. y O'Brien, J.J. 2003: Isthmus of Tehuantepec wind climatology and ENSO signal, *Journal of Climate*, **16**, 2628-2639.
- Trasviña, A., Lluch, D., Filonov, A. y Gallegos, A. 1999. Oceanografía y El Niño. p. 69-101. In Víctor O. Magaña (ed.). *Los Impactos de El Niño en México*. UNAM, México.
- Trasviña, A., Barton E.D., Brown, J., Vélez, H.S., Kosro, M. y Smith, R.L. 1995. Offshore Wind Forcing in the Gulf of Tehuantepec, Mexico: the asymmetric circulation. *J. Geophys. Res.*, **100**(C10), 20, 649-20,663.
- Trasviña, A. y Barton, E.D. 2008. Summer circulation in the Mexican tropical Pacific. *Deep -Sea Research I* **55**: 587-607.
- Trasviña, A., Barton, E.D., Velez, H.S. y Brown, J. 2002. Frontal subduction of a cool surface water mass in the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Geofísica Internacional*. **42**: 101-114
- Wooster, W.S. y Cronwell, T. 1958. An oceanographic description of the eastern tropical Pacific. *Bull. Scripps Inst. Oceanogr.* **7**(3):169–281.
- Zamudio, L., Hurlburt, H. E., Metzger, E. J., Morey, S. L., O'Brien, J. J. , Tilburg, C. y Zavala-Hidalgo, J. 2006. Interannual variability of Tehuantepec eddies, *J. Geophys. Res.*, **111**, C05001, doi: 10.1029/2005JC003182.