



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMOSFERA**

**“VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y SU EFECTO EN LA PRODUCTIVIDAD
DEL GOLFO DE TEHUANTEPEC Y ÁREAS ALEDAÑAS”**

T E S I S

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**P R E S E N T A:
MARÍA VIOLETA PIÑA GONZÁLEZ**

**T U T O R
DR. ERNESTO DOS SANTOS CAETANO NETO (IGg UNAM)**

**MIEMBROS DEL COMITÉ TUTORAL
Dr. Artemio Gallegos García (ICMyL, UNAM)
Dra. Leticia Gómez Mendoza (Colegio de Geografía, FFyL, UNAM)
Dr. Juan Matías Méndez Pérez (Universidad Veracruzana)
Dr. Armando Trasviña Castro (CICESE)**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

"Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, la obra de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales".

Agradecimientos

Ofrezco mi más sincero agradecimiento al Dr. Ernesto Caetano, por su comprensión, enseñanza y sobre todo, gran paciencia en la realización de esta tesis. Gracias por haberme tenido confianza y ayudado en este primer paso en la investigación en las Ciencias Atmosféricas.

A los sinodales, Dra. Leticia Gómez M., Dr. Artemio Gallegos G., Dr. Armando Trasviña C. y al Dr. Matías Méndez P., por el tiempo dedicado en la revisión de la presente tesis.

Al Dr. Víctor Magaña por su apoyo y confianza para ingresar al grupo de Clima y Sociedad, además de su enseñanza y una gran paciencia en todo este tiempo. Así como al Lic. en Instrumentación, Gustavo Vázquez, por su ayuda en cómputo desde que llegue al grupo.

Al Ing. Erick Márquez del Instituto Nacional de Pesca, por su ayuda en la realización de esta tesis con el procesamiento de las imágenes de satélite MODIS y por su amistad.

Al M. en C. Clemente López por su ayuda en la realización de los scripts para las corridas de los pronósticos y a la M. en C. Armenia Franco por su enseñanza en la realización de los mapas; y también por su amistad.

A todos mis compañeros y amigos del grupo: Emmanuel, Luis, y Eduardo, por ayudarme en todo momento y brindarme su amistad. A Dany, Mar, Tania, Caro, Armenia, Clemente, Roberto, Boris, Héctor, Christian, Nuria y Pablo por brindarme su amistad y confianza. A Yazmin y Jaime, del instituto de Geología, por estar siempre conmigo y por último pero no menos importante, a Lae, Stephy y Dalía por que en tan poco tiempo, y sin ser del área, me brindan su confianza y amistad, a todos ustedes, muchas gracias. Los quiero mucho.

Por último, agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), bajo el número de solicitante 351904 por otorgarme ayuda económica durante mi estancia en el posgrado de Ciencias de la Tierra y por el proyecto No. 107997 "Una estrategia para la reducción de riesgos en protección civil basada en información de tiempo y clima"; Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), por su apoyo económico a través del proyecto "Un sistema de monitoreo de tiempo meteorológico para el Valle de México" clave IT100712.

Dedicatoria

*Esta tesis va dedicada, a mis padres (**Luz y Silvestre**) por todas sus enseñanzas, regaños y cuidados, amor y comprensión a lo largo de toda mi vida, a mis abues (**lupe y lolo**) por su experiencia transmitida al igual que su amor incondicional. Los quiero muchooooo.*

*A mis hermanas **Yaz y Azu**, por todo su cariño y paciencia, gracias por darme ánimo y aliento para seguir adelante, así como también a mis cuñados, **Ángel y Bernardo** por ayudarme en todo momento y por hacer feliz a mis hermanas (más les vale que así sea, eh) mil gracias.*

*A mis primos, **Cristina, Manuel, Rubí y Mario**, que junto con sus hijos (**Danna, Camila, Gael y Alan**) me brindan su cariño, a mis tí@s, **prim@s y sobrín@s**, tanto de sangre como políticos, gracias por los recuerdos de momentos muy agradables en su compañía.*

*Y principalmente, la tesis se la dedico a unas personitas que desde hace tiempo le han dado a mi vida mucha alegría, luz y esperanza, sin ustedes no sería lo mismo, **Ángel Gabriel, Emiliano y Diego**, los AMOOOO con todo mi corazón. Siempre contarán conmigo, nunca lo olviden.*

A todos y cada uno de ustedes, muchas gracias.

Resumen.....1

Capítulo I: INTRODUCCIÓN

1.1 La riqueza productiva en el litoral mexicano.....2

1.2 Productividad: elementos principales y su funcionalidad.....4

 1.2.1 Cadena trófica en los océanos.....4

 1.2.2 Productividad primaria (clorofila_a).....6

 1.2.3 La productividad primaria y su relación con las surgencias (mezcla vertical).....9

1.3 Uso de la percepción remota para evaluación de la productividad en el mar.....10

1.4 La producción pesquera y su manejo: programas generales y visión de México.....11

1.5 Estudio de caso: Golfo de Tehuantepec, Oaxaca.....13

1.6 Planteamiento del problema18

1.7 Objetivos.....20

1.8 Estructura de la tesis.....21

Capítulo II: PROCESAMIENTO DE DATOS

2.1. Imágenes satelitales.....22

2.2. Imágenes MODIS del sensor AQUA.....22

 2.2.1. Clorofila_a.....24

2.2.2. Temperatura superficial de mar	25
2.3. Cálculo de la productividad en el mar en función de fenómenos meteorológicos y oceánicos	26
2.3.1. Mezcla vertical producida por los vientos que influye en la variabilidad de la clorofila	26
2.3.2. Procesamiento de imágenes MODIS	28
2.3.3. Correlación de Clorofila _a (Chlo _a) y Temperatura Superficial del Mar (TSM)	29
2.4. Uso de la herramienta de predicción climática (CPT) para pronósticos de productividad clorofila _a	31
2.5. Eventos meteorológicos y su influencia en la productividad del océano	33
2.6. Caso de estudio: Tormenta Tropical Agatha	35
2.7. La pesca de huachinango	36

Capítulo III: RESULTADOS

3.1. Antecedentes	37
3.2. Surgencia	39
3.3. Temperatura superficial del mar	41
3.4. Clorofila _a	42

3.5. Variabilidad de la clorofila _a y de la temperatura superficial del mar	45
3.6. La productividad en el Golfo de Tehuantepec	49
3.7. Caso de estudio: Tormenta Tropical Agatha	50
3.8. Pesca de Huachinango	54
3.9. Pronóstico estadístico de productividad	58

Capítulo IV: CONCLUSIÓN Y PERSPECTIVAS

4.1. Conclusiones	62
4.2. Perspectivas a Futuro	64

Capítulo V: LITERATURA CITADA

Referencias	66
Páginas de internet	72

Capítulo I: **INTRODUCCIÓN**

Fig. I.1. Imagen local de MODIS del día 24 de octubre de 2010 proporcionada por la NASA. (Fuente de datos: ftp://conabioweb2.conabio.gob.mx/BIN_level1b/2010/1010/20101024.1948.a1.modis_cal)

10

Fig. I.2. Imagen del área de estudio en el Golfo de Tehuantepec y áreas adyacentes, los colores indican la concentración de clorofila *a* de 0.1 mg/m³ color azul a 5 mg/m³ color rojo, lo observado de color blanco son concentraciones mayores a 5 mg/m³ debido a que existen épocas en las que se encuentran en la superficie plantas acuáticas que reflejan la clorofila *a* dando como resultado una concentración mayor a la requerida para el océano. (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products)

14

Capítulo II: **PROCESAMIENTO DE DATOS**

Fig. II.1. Imagen global de MODIS con una resolución de 500m, proporcionada por la NASA. (Fuente de datos: <http://modis.gsfc.nasa.gov>)

24

Fig. II.2. Imagen MODIS AQUA de concentración de clorofila (de 0.1 mg/m³ color morado a 5 mg/m³ color rojo) del mes de julio de 2002 con 1km de resolución. El continente se observa en color negro. (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products)

25

Fig. II.3. Imagen MODIS AQUA de Temperatura superficial del mar nocturna (de 21° de color azul -31°C de color rojo) del mes de julio de 2002 con 1km de resolución. El continente se observa de color negro. (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products)

26

Fig. II.4. Imagen de las componentes zonal y meridional del estrés del viento, del día 19 de Noviembre de 2009, a las 12Z en Pascales. Cortesía del CoastWatch NOAA. (<http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/griddap>)

27

Fig. II.5. Imagen de surgencia (m/s), del día 19 de Noviembre de 2009, a las 12Z. Cortesía del CoastWatch NOAA. (<http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/griddap>)

28

Fig. II.6. Área de estudio en el Golfo de Tehuantepec, los colores indican la concentración de clorofila *a* de 0.1 mg/m³ color azul a 5 mg/m³ color rojo, lo observado de color blanco son concentraciones mayores a 5 mg/m³ debido a que existen épocas en las que se encuentran en la superficie plantas acuáticas que reflejan la clorofila *a* dando como resultado una concentración mayor a la requerida para el océano. (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products).
-----29

Fig.II.7. Área de estudio con puntos en donde se obtuvieron datos para observar los valores de la temperatura y la clorofila *a*. En color azul se observan concentraciones de clorofila de 0.05 a 5.5 mg/m³, el color morado presenta valores menores al 1.0 mg/m³, y el color blanco representa valores mayores al 5.5 mg/m³ (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products).
-----30

Fig.II.8. Figura en la que se muestran tipos de correlaciones en modelo lineal.-----31

Fig. II.9. Pantalla de inicio de *Climate Predictability Tool* (CPT), para Windows-----32

Fig. II.10. Delimitación de los transectos: **a** (95.2°N de latitud) y **b** (13.8°W de longitud) dentro del área de estudio en el Golfo de Tehuantepec y zonas aledañas. Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products.
-----34

Fig. II.11. Regiones Niño en el Océano Pacífico Ecuatorial (OPE), como conclusión del monitoreo del sistema El Niño/La Niña-Oscilación del Sur (ENSO), tomado del IRI, 2007.-----35

Fig. II.12. Imagen satelital, cortesía de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), en la que se muestra la Tormenta Tropical Agatha tomada el 29 de mayo de 2010.-----36

Capítulo III: RESULTADOS

Fig. III.1. Mapas de Clorofila *a* (de 0.05 mg/m³ a 5.5 mg/m³) y de temperatura superficial del mar (23.5°C a 29°C) tanto para los años con fenómenos de El Niño, La Niña y en años normal, desde el 2003 al 2010. Las áreas blancas que se observan en el mapa de La Niña son por falta de datos. (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products).
-----38

Fig. III.2. Mapas de surgencias (m/s) en el Golfo de Tehuantepec, para las diferentes épocas del año (primavera, verano, otoño e invierno) durante el 2009. (Fuente de datos: <http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/griddap>).-----40

Fig. III.3. Mapas de temperatura superficial del mar (23.5°C a 29°C) en el Golfo de Tehuantepec, para las diferentes épocas del año (primavera, verano, otoño e invierno) durante el 2009. (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products).-----41

Fig. III.4. Imagen de satélite en la que se observa la concentración de clorofila *a* en el Golfo de Tehuantepec, en enero de 2009. (En color verde se encuentran valores de 0.5 a 1 mg/m³ mientras que en color azul, se encuentran valores de 5mg/m³ y en color morado valores mayor a los 5mg/m³, esto es cerca de la costa y en zonas de surgencias (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products).-----42

Fig. III.5. Mapas de clorofila *a* (de 0.05 a 5.5 mg/m³) en el Golfo de Tehuantepec, para las diferentes épocas del año (primavera, verano, otoño e invierno) durante el 2009. (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products).-----43

Fig. III.6. Mapas de la zona de estudio en la que se observan concentraciones de clorofila *a* (mg/m³), surgencia (m/s) y datos de viento para los meses de septiembre y octubre del 2009. (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products y <http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/griddap>).-----44

Fig. III.7. Área de estudio con puntos en donde se obtuvieron datos para observar los valores de la temperatura y la clorofila *a*. En color azul se observan concentraciones de clorofila de 0.05 a 5.5 mg/m³, el color morado presenta valores menores al 1.0 mg/m³, y el color blanco representa valores mayores al 5.5 mg/m³ (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products).-----46

Fig. III.8.a. Correlaciones entre la clorofila *a* (mg/m³) y la temperatura superficial (°C) del mar en puntos cercanos a la surgencia, en años La Niña (azul), El Niño (rojo) y Normal (amarillo)-----47

Fig. III.8.b .Correlaciones entre la clorofila_a (mg/m³) y la temperatura superficial del mar (°C) en puntos alejados de la surgencia, en años Niña (azul), Niño (rojo) y Normal (amarillo)
-----48

Fig. III.9.a.Transecto latitudinal que muestra la evolución anual de la temperatura superficial del mar y clorofila_a desde al año 2003 al 2010. (Las zonas cercanas a la costa en color blanco, representan concentraciones mayores a los 5 mg/m³) (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products).
-----49

Fig.III.9.b.Transecto longitudinal que muestra la evolución anual, de la temperatura superficial del mar y clorofila_a desde el año 2003 al 2010. (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products).
-----50

Fig. III.10. Clorofila y temperatura observada antes, durante y después del paso de la Tormenta Tropical Agatha, del 29 al 30 de mayo de 2010. Las áreas blancas que se observan en los mapas son por falta de datos. (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products).
-----52

Fig. III.11.-Imagen satelital del 29 de mayo de 2010 en la que se muestra la presencia de la Tormenta Tropical Agatha en tierra sobre Chiapas - Guatemala. (Tomada de CNA-CGSMN _ GOES-13 IR4 Mayo 29.2010/23:45 GMT).
-----53

Fig. III.12.-Distribución del Pargo liso o *Lutjanus peru* (Nichols & Murphy, 1922) (los puntos rojos son las zonas en las que se han reportado esta especie).
-----56

Fig.III.13. Distribución del Pargo lunarejo o *Lutjanus guttatus* (Steindachner, 1869) (los puntos rojos son las zonas en las que se han reportado esta especie).
-----57

Fig. III.14.a.-Clorofila observada Vs pronosticada de los meses de enero, abril, julio y octubre del 2009, mediante el software CPT del IRI integrando la TSM (°C) como predictante. En las zonas blancas no existen datos (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products).
-----59

Fig. III.14.b. Clorofila observada Vs pronosticada de los meses de enero, abril, julio y octubre del 2010, mediante el software CPT del IRI integrando la TSM (°C) como predictante. En las zonas blancas no existen datos (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products).
-----61

"Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, la obra de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales".

Resumen

El presente trabajo, tiene como finalidad el de ubicar las áreas de mayor productividad en el océano, utilizando las variables de Chlo_a y TSM de imágenes Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) del sensor AQUA, desde enero de 2003 a diciembre de 2010 a 1Km de resolución. Para la realización de una base climatológica y de esta manera estudiar la variabilidad, se utilizó el esquema estadístico conocido como Climate Predictability Tool (CPT) del Internacional Research Institute for Climate and Society (IRI) obteniendo mapas de pronóstico para los años 2009 y 2010 en el Golfo de Tehuantepec, Oax., el cual, dadas sus condiciones oceanográficas y meteorológicas especiales, se caracteriza por ser una región oceánica excepcional, principalmente, por fenómenos de surgencia, que lo convierten en un sistema muy productivo y dinámico destacando su enorme riqueza biológica en los procesos de producción, consumo e intercambio energético, en particular de dos especies de huachinangos (peces marinos) incluidos en la familia *Lutjanidae* (*Lutjanus peru* y *L. guttatus*) que coexisten en las costas del Pacífico Mexicano, y que se capturan de manera persistente a lo largo de todo el año con las mismas artes y en las mismas zonas de pesca, siendo de gran importancia para las pesquerías ribereñas. Sin embargo el desarrollo de la pesca se ve afectado por la actividad de fenómenos atmosféricos, en este caso de la Tormenta Tropical Agatha (TTA), como primer ciclón de la temporada en el 2010, al cobrar la vida de decenas de personas, desplazando a cientos de miles, y ocasionando pérdidas económicas en la destrucción de miles de hogares e infraestructura, frenando de cierta manera la sobrepesca de especies de importancia comercial.

La percepción remota puede ser definida como la adquisición de un objeto o un evento sobre bases de mediciones tomadas a cierta distancia de él para la caracterización del medio ambiente (Townsend, 2012; Finkl & Makowski, 2014). En la práctica, el término es normalmente utilizado para describir la recolección y análisis de datos hecha por instrumentos transportados en la atmósfera de la Tierra. El monitoreo a largo plazo de los fenómenos puede proporcionar un mejor entendimiento del medio ambiente físico que soporta la actividad biológica y establece la línea de base sobre la cual eventos divergentes pueden ser medidos al ser integrada a otras fuentes de información, generando una serie de datos para facilitar la explotación y manejo de todo tipo de ambientes, tanto terrestre como marino (Lira, 1987).

Una de sus aplicaciones se enfoca en el manejo de las pesquerías, a través de la observación de fenómenos en la superficie del mar asociados con la distribución de especies, esto es involucrando un mapeo en actividades de pesca dentro de un área dado (Lira, 1987).

1.1. La riqueza productiva en el litoral mexicano

El mar rodea la mayor parte del territorio mexicano (con un total de 10,143 km de litoral), abarcando las aguas del océano Pacífico y el Golfo de California (7,338 km) y las aguas del océano Atlántico y el Mar Caribe (2,805 km). La zona del Pacífico se caracteriza por ser un área de gran actividad tectónica y tener una plataforma continental muy estrecha. Una de las corrientes marinas más importantes de esta zona es la Corriente fría de California (CC), misma que transporta gran cantidad de organismos que nutren a las especies marinas, por la cual la pesca en el Pacífico es tan importante.

Del lado del Océano Atlántico, la plataforma continental es mucho más amplia, su costa es arenosa y baja, por lo tanto los movimientos tectónicos son poco importantes. En estas costas la corriente marina más importante es la Corriente Cálida del Golfo (CG), que transporta una menor cantidad de nutrientes que la CC, razón por la cual la pesca en estas zonas es mucho menos importante.

La zona del Caribe, presenta una amplia plataforma continental, se distingue por sufrir un proceso lento pero de constante elevación, por lo que posee una especial característica: los arrecifes de coral que nacieron, gracias a la calidez de sus aguas, han sido como consecuencia de la acumulación de rocas calcáreas y evaporíticas, lo mismo que la formación milenaria de algunos posibles yacimientos petrolíferos. Estas formaciones, además de servir como refugio y hábitat de una gran cantidad de especies acuáticas, tienen gran importancia en la promoción del turismo en la llamada Riviera Maya, especialmente en Cancún y Cozumel.

La pesca en México tiene un gran valor económico, social y alimenticio a nivel regional con impactos significativos; en algunos casos, el aumento en la producción ha contribuido en la solución de problemas de alimentación y de generación de empleos. Según SAGARPA (2012) la producción estimada al mes de junio de 2012, fue de 864 mil 558 toneladas en peso vivo, 1.9% más que en el mismo periodo de 2011, esto es debido a que en la captura se observó un crecimiento del 3.1% respecto al mismo periodo de 2011, donde destacan pesquerías como: calamar, túnidos y pelágicos menores.

La distribución del área litoral y la diferencia de condiciones climáticas y geológicas que se registran en la zona del Pacífico y del Golfo de México, determinan la presencia de una innumerable diversidad de recursos marinos y costeros. Los litorales nacionales se aprovechan principalmente para la pesca y de acuerdo al volumen de producción se distinguen tres zonas:

I) La zona noroeste, que incluye los puertos pesqueros de Ensenada, Guaymas, Mazatlán, Topolobampo y La Paz, es la más importante, ya que por la influencia de una corriente marina fría proveniente del norte de Canadá, denominada como Corriente de California, convierten a sus aguas en un hábitat idóneo para el desarrollo y la reproducción de especies como el camarón, el atún, el abulón, entre otras.

II) En lo que se refiere al Golfo de México, aquí, más que la influencia climática, son sus características geológicas las que favorecen el desarrollo de esta actividad. En el Golfo se encuentra una amplia plataforma continental, es decir, una prolongación de rocas y minerales, que se hallan a una profundidad de menos de 200 m, en donde la incidencia de los rayos solares promueve la formación de plancton, y por ende, existe una concentración de camarones, langostas y otros productos muy solicitados en el mercado internacional.

III) La tercera y última zona pesquera en el país son algunas pequeñas áreas cercanas a los puertos de Salina Cruz y Manzanillo, ahí la pesca es de menor escala y, fundamentalmente, se dirige al mercado nacional.

1.2 Productividad: elementos principales y su funcionalidad

Los océanos son los sistemas de generación de alimentos más grandes del mundo considerando su productividad primaria, de esta manera México, tiene una posición privilegiada por su situación geográfica en el continente americano, tanto así, que su acceso a dos océanos y su gran extensión de litorales nos lleva a una gran diversidad de ambientes ecológicos. En este sentido, el rol de la biota oceánica en el ciclo global del carbono es conocido en forma cualitativa.

1.2.1 Cadena trófica en los océanos

Es importante saber que en el funcionamiento de los ecosistemas no ocurre ningún desperdicio y para la mayor parte de los seres vivos, una vez asentados en un entorno adecuado, el problema primario de cara a su subsistencia es la alimentación. Por lo tanto, el

estudio de las relaciones interespecíficas en el ecosistema se da por un intercambio de materia/energía por las necesidades alimenticias de cada especie. En términos generales, estas relaciones entre distintos individuos constituyen la cadena alimenticia o cadena trófica (Sumich & Morrissey, 2004; Townsend, 2012; Levinton, 2013).

En un ecosistema acuático la biodiversidad, o número de especies vegetales y animales que habitan en él, es menor que en uno terrestre. Estos ecosistemas están influidos por los aportes y pérdidas de materiales con el exterior por vías biológicas, geológicas, atmosféricas e hidrológicas. Además, en los lagos y lagunas se produce un movimiento de nutrientes y energía a través de las cadenas tróficas.

Cada ser vivo tiene la característica de fabricar su propio alimento o de buscar y consumirlo del medio ambiente. Según la forma de conseguir e incorporar la materia y energía en una cadena, los seres vivos se pueden clasificar en: productores, consumidores y desintegradores; cada uno de ellos representa una característica común que los ubica en un nivel determinado dentro de un sistema natural y se le denomina eslabón o nivel trófico.

Una cierta cantidad de vegetales, algas en su mayoría, viven en el mar, lo que constituyen el llamado fitoplancton. Todos estos vegetales, utilizando las radiaciones solares, transforman las sales minerales y el gas carbónico disueltos en el agua para sintetizar su propia materia orgánica y así poder crecer y reproducirse. Estas algas microscópicas, junto con las grandes algas, son seres autótrofos, es decir, que fabrican su propia comida y son los únicos en el sistema capaces de crear materia orgánica a partir de materia mineral y energía solar, por esta razón se les denomina productores primarios (Sumich & Morrissey, 2004; Townsend, 2012; Levinton, 2013).

El fitoplancton sirve de alimento a una gran cantidad de animales de pequeño tamaño que flotan pasivamente en el agua, y que constituyen el llamado zooplancton. También sirven de alimento a otros animales herbívoros tales como crustáceos, moluscos o peces. Este

conjunto de animales heterótrofos, es decir, incapaces de fabricar su propia comida, tienen que alimentarse de forma inevitable de aquellos **productores primarios**, por lo que son denominados **consumidores primarios**. A su vez, el zooplancton, va a servir de alimento a otros animales heterótrofos de mayor talla, que en general suelen ser carnívoros que se alimentan de otros animales, y se les denomina **consumidores secundarios**. Los **desintegradores o descomponedores**, entran en acción cuando alguno de los organismos que componen la cadena alimenticia muere. Éstos degradan los restos del individuo devolviendo la materia orgánica y parte de la energía al sistema y además pueden actuar a lo largo de toda la cadena alimentaria (Sumich & Morrissey, 2004; Townsend, 2012).

1.2.2 Productividad primaria (clorofila_a)

La productividad es la velocidad de almacenamiento de la energía en el ecosistema y puede ser dividida en primaria y secundaria. La primaria se refiere a la velocidad en que la energía es almacenada por efecto de la actividad fotosintética; este almacenamiento se lleva a cabo en forma de materiales orgánicos susceptibles de ser utilizados como el almidón, la sacarosa y la glucosa que están presentes en hojas, raíces, tallos y frutos de los vegetales. La secundaria es la velocidad de almacenamiento de la energía en el nivel de los consumidores y desintegradores; este almacenamiento ocurre en el nivel de la biomasa que constituye el cuerpo de estos organismos.

Del total de la productividad primaria en los vegetales, una parte de la energía se consume en la respiración; la otra se utiliza en el crecimiento y la reproducción, posteriormente, es transferida a los consumidores (Sharp, 2004; Townsend, 2012).

Cuando se dice que un ecosistema es muy productivo, se está haciendo referencia a un espacio en el cual hay una gran densidad de plantas y animales que captan, transforman y almacenan energía. Tal es el caso de muchas de las zonas tropicales y subtropicales; en contraste, existen ecosistemas como los desiertos donde hay muy pocos animales y

vegetales que pueden almacenar la energía proveniente del sol, por lo tanto, estos lugares son considerados como zonas de poca productividad (Townsend, 2012; Levinton, 2013).

El fitoplancton marino realiza la fotosíntesis, convirtiendo el carbono inorgánico disuelto en el agua en partículas orgánicas y materia orgánica disuelta, es decir, como productividad primaria en forma de **clorofila_a**, sin embargo, para lograrlo son necesarios los componentes abióticos del ecosistema marino como la luz, la salinidad, los nutrientes y la temperatura, además de la interacción que tiene el océano con la atmósfera, en la formación de los remolinos, frentes y los bordes de hielo que dan como resultado cambios en la temperatura del agua, turbulencia o transporte, siendo un principal determinante para una buena producción en pesca (Townsend, 2012; Levinton, 2013).

La biomasa (bm) y producción del fitoplancton (clorofila_a) son la base principal de las redes tróficas que se desarrollan en el ecosistema pelágico del océano. En los sistemas acuáticos la bm del fitoplancton es primordialmente responsable de la transformación del dióxido de carbono en carbono orgánico. Por lo tanto resulta esencial conocer la variabilidad espacial y temporal del fitoplancton para entender los ciclos del carbono oceánico, los cambios en las poblaciones de recursos pesqueros y el acoplamiento del forzamiento físico-biogeoquímico de los ecosistemas pelágicos con una base regional (Townsend, 2012; Levinton, 2013).

A partir del uso de sensores satelitales que captan el color del océano ha sido posible estimar la bm del fitoplancton (clorofila_a) a grandes escalas espaciales y conocer su variabilidad causada por forzamientos climáticos de gran escala como El Niño y La Niña. Los resultados derivados de la información del color del océano han revolucionado el campo de la oceanografía biológica, con importantes contribuciones a la biogeoquímica, oceanografía física, modelos del sistema oceánico, pesquerías y al manejo costero. Actualmente, la clorofila_a del fitoplancton es un componente biológico del ecosistema

marino que puede ser monitoreado por medio de la percepción remota del océano, además de materia orgánica disuelta y nutrientes (Platt et al, 1988, 2003).

1.2.3 La productividad primaria y su relación con las surgencias (mezcla vertical)

La surgencia o mezcla vertical es uno de los procesos de interacción océano-atmósfera de importancia clave en la productividad de los ecosistemas marinos costeros; se le denomina de esta manera a los movimientos verticales ascendentes que transportan agua de niveles subsuperficiales hasta la capa superficial del océano, al igual que a los movimientos horizontales asociados que la remueven de las regiones donde ocurren estos eventos (Bulkagov & Zatarain, 2006). Este movimiento vertical, genera cambios físicos y químicos en la zona eufótica (zona de la columna del agua a la que llega luz del sol), tales como disminución de temperatura y del oxígeno y aumento de los nutrientes, especialmente nitrato (Sumich & Morrissey, 2004; Townsend, 2012). Este fenómeno genera alta productividad debido a que el agua subsuperficial fría y rica en nutrientes, al ser desplazada a la superficie, se calienta y ocurren florecimientos fitoplanctónicos, generándose así excelentes áreas para la acuicultura y la pesca, en general, el consecuente aumento de la productividad primaria es un proceso complejo de interacción físico-biológico (Lima et al, 2002). La mayoría tiene lugar en la costa Oeste de los continentes, sobre todo en la Zona de Convergencia Intertropical afectada por los vientos alisios.

En el Golfo de Tehuantepec la orografía local tiende a canalizar estos vientos y hacer que su dirección excepcionalmente estable y previsible den como resultado la formación de zonas de afloramiento y frentes que se extienden lejos de la costa (Belkin & Cornillon, 2003).

Se pueden distinguir varios tipos de surgencias o movimiento vertical:

Oceánica: producida por los vientos alisios, ocurre en mar abierto son más comunes en el Océano Pacífico.

Costera: producida por vientos, tiene lugar en los bordes de los continentes como en las costas de California y Oregón, costa de Perú y las de África.

Estacional: controlada por los monzones, debido a las diferencias de calor tierra-mar entre verano e invierno. En invierno, el viento sopla de la tierra hacia el mar, desplazando el agua de la costa causando el afloramiento o surgencia. Esto ocurre en el Golfo de Omán y otros del Océano Índico.

1.3 Uso de la percepción remota para evaluación de la productividad en el mar

La comprensión que se tiene acerca de los ciclos biogeoquímicos se ha beneficiado desde la llegada del color del océano por teledetección, en particular, para la estimación de producción primaria de los océanos a escala global. Estas estimaciones se apoyan en modelos, que varían en la formulación y en la complejidad, pero basados en la teoría. Típicamente los modelos de producción primaria requieren, como parámetros de entrada, la radiación fotosintética disponible (Photosynthetically available radiation sus siglas en inglés PAR), una estimación de la biomasa del fitoplancton (clorofila_*a*) y una función que describa la respuesta fotofisiológica a la PAR (Uitz et al, 2010).

De tal manera la oceanografía satelital es una herramienta que ayuda a procesar e interpretar mediciones de la radiación emitida y reflejada por la superficie del mar, con sensores activos y pasivos que miden la radiación electromagnética en distintas bandas de longitud de onda, obteniendo la información necesaria para calcular la temperatura, determinar el color y estimar la rugosidad y la topografía de la superficie del mar (Lluch-Cota et al, 1997; Zhan, 2008).

El color verde está asociado con la presencia de clorofila_*a* (Chlo_*a*), el pigmento retenedor de la luz del fitoplancton, por lo que se han desarrollado técnicas para cuantificar la productividad biológica sobre la base de distribución y abundancia de esta variable (fig. I.1)

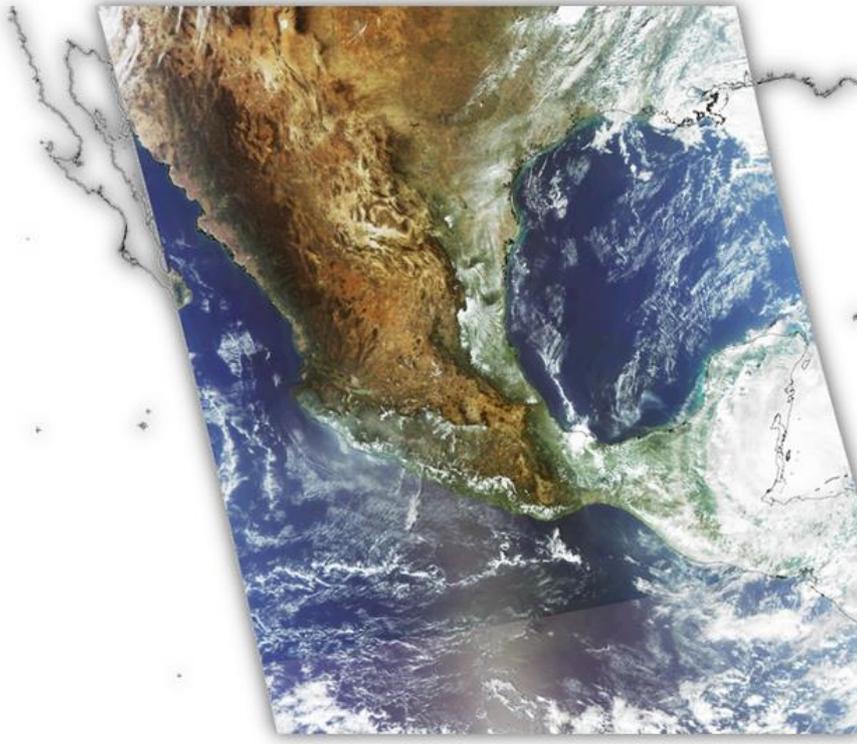


Fig. I.1 Imagen local de MODIS del día 24 de octubre de 2010 proporcionada por la NASA. (Fuente: ftp://conabioweb2.conabio.gob.mx/BIN_level1b/2010/1010/20101024.1948.a1.modis_cal)

La temperatura del agua es otro factor importante en la determinación de la distribución de peces. Para ello son utilizados sensores térmicos para producir mapas de la temperatura de la superficie del mar (TSM). Tal mapeo puede ser utilizado para identificar aguas de surgencias y localizar las fronteras entre aguas calientes y aguas frías donde es sabido que varias especies se congregan.

La percepción remota puede ser valiosa en la caracterización del medio ambiente marino y costero, involucrando la actualización de cartas de navegación con datos de líneas de costa y batimétricos, el mapeo de los tipos y distribución de humedales costeros y la identificación de plantas marinas y tipos de sedimentos en la zona de intermareas en aguas bajas o someras y el monitoreo de la condición de los arrecifes coralinos. También puede ser utilizada para observar fenómenos más dinámicos como patrones de turbidez (debido a materiales orgánicos e inorgánicos), corrientes, mezcla de agua dulce y salada y regiones

de vientos y olas, por lo tanto el diagnóstico de los fenómenos puede proporcionar un mejor entendimiento del medio ambiente físico que soporta la actividad biológica y establece la línea de base sobre la cual eventos meteorológicos pueden ser medidos, además de pronósticos del tiempo para mayor seguridad de los pescadores en el mar.

Una de sus aplicaciones de la percepción remota, se enfoca en el manejo y explotación de las pesquerías, aunque la detección directa de peces sería el objetivo más obvio pero la percepción remota es muy difícil de lograr. La observación de peces desde un avión es utilizado para localizar un gran número de especies pelágicas como la anchoveta, el pez espada, la sardina y el atún. Diferentes especies pueden ser distinguidas sobre la base de su color, comportamiento y patrones de agregación o patrón del cardumen.

Un tipo modificado de detección directa de peces, hace uso del fenómeno de bioluminiscencia que es la emisión de luz de ciertos tipos de plancton cuando son perturbados por el movimiento de peces. Este fenómeno ha sido reconocido por pescadores y es regularmente utilizado para localizar peces cuando son abundantes los organismos bioluminiscentes. Se han realizado esfuerzos para obtener imágenes bio-luminiscentes de satélites orbitales que barren la parte oscura de la Tierra. Sin embargo, la detección indirecta de peces puede ser posible a través de la observación de fenómenos de la superficie del mar asociados a la distribución de peces, simplemente involucrando el mapeo de distribución en actividades de pesca dentro de un área dada.

1.4 La producción pesquera y su manejo: programas generales y visión de México

México se encuentra entre los primeros 20 países en producción pesquera, con alrededor de 1.4 millones de toneladas anuales que significan el 1.5% de la captura mundial y casi dos tercios de la producción a nivel regional proviene de Sonora, Sinaloa, Baja California y Baja California Sur. En la actualidad la captura nacional se basa en los pelágicos

menores (sardinias, macarelas, etc.) y en mayores (atún, calamar y camarón). (INAPESCA, 2009).

Por tal motivo la **Ley General de Pesca y Acuicultura Sustentables** (LGPAS) del 2012 contempla atribuciones específicas para el **Instituto Nacional de Pesca** (INAPESCA), con la finalidad de hacer de la pesca una actividad segura y viable en términos técnicos, económicos y sociales. La actualización y ampliación de instrumentos legales y normativos tales como las Cartas Nacionales Pesquera y Acuícola, los Planes de Manejo Pesquero y Acuícola, las Opiniones y Dictámenes Técnicos y las Normas Oficiales, son instrumentos de gestión, que se elaboran y actualizan con la participación de investigadores y de sectores productivos de la pesca y la acuicultura, a fin de determinar los niveles de captura máxima permisible, el esfuerzo pesquero susceptible de aplicarse a cada pesquería, así como los métodos, las técnicas y equipos de pesca y acuicultura de menor impacto ambiental y mayor valor agregado (SAGARPA, 2010, 2011, 2012).

En el Pacífico y el Golfo de México, los proyectos de investigación a cargo del INAPESCA se llevan a cabo en los 14 Centros Regionales de Investigación Pesquera; además, a fin de atender el ámbito nacional, se realizan diversas actividades en las oficinas centrales con sede en el Distrito Federal, incluidas algunas relacionadas con la acuicultura, esto es con el propósito de recomendar medidas de manejo mediante la evaluación del estado de salud de los recursos marinos, de las aguas interiores y de aquellos sujetos a cultivo. (SAGARPA 2012).

Actualmente se tienen programas de ordenamiento para el sector pesquero, con la finalidad de contribuir a la explotación y aprovechamiento sustentable de los recursos pesqueros y acuícolas al emitir permisos, cuidando el esfuerzo pesquero ejercido sobre cada pesquería de conformidad con la Carta Nacional Pesquera (INAPESCA, 2004, 2006, 2010). Uno de ellos es el Programa Nacional de Información Científica en Pesca y Acuicultura (PNICTPA)

operado por la Red Nacional de Información e Investigación en Pesca y Acuicultura (RNIIPA) contando con los lineamientos de la Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca (CONAPESCA), lo cual debe ser un proceso dinámico de instrumentación, evaluación, adecuación y mejoramiento continuo, con base en las áreas de oportunidad que los mercados y las demandas de los sectores promuevan. Además existe el Programa de Apoyo al Cambio Tecnológico en las Actividades Acuícolas y Pesqueras, es operado por el **Fideicomiso de Investigación (FIDEMAR)**, el cual, como organismo privado recibe recursos públicos para financiar el desarrollo del **Programa Nacional de Aprovechamiento del Atún y Protección de Delfines y Otros** en torno a Especies Acuáticas Protegidas (INAPESCA, 2009; Cisneros-Mata, 2011).

En la actualidad se están evaluando los resultados de todos los programas en cuestión de pesca para hacer un mecanismo de ajuste en los financiamientos y seguirle dando apoyo a cada uno de ellos.

1.5 Estudio de caso: Golfo de Tehuantepec, Oaxaca

El Golfo de Tehuantepec está localizado en la porción trópico-oriental, al sureste de la República Mexicana, delimitado por las coordenadas 11.5°-16.5° latitud Norte y 91.5°-98.5° longitud Oeste, frente a los estados de Oaxaca y Chiapas (Carranza et al, 1998). Es una región de aproximadamente 125,000 Km², con una plataforma continental muy estrecha en la porción occidental, mientras que la parte oriental es muy extensa (Monreal & Salas, 1998) (Fig. 1.2).

La gran variedad de especies existentes en la costa oaxaqueña ha permitido el desarrollo de una significativa actividad pesquera. La pesca ribereña se realiza en botes de remo, vela y motor, anteriormente se empleaban canoas que actualmente se utilizan para la pesca de pargos, robalos y corvina, pesca que para algunas comunidades es básica para obtener ingresos. Sin embargo, actualmente, Oaxaca es uno de los estados que menos producción

pesquera aporta al país teniendo en cuenta que es un estado que cuenta con litoral cercano a los 600 kilómetros de longitud. La pesca, es una actividad que en otros tiempos tuvo relevancia, sin embargo, las cooperativas viven una fuerte descomposición, además de carecer de infraestructura para conservar la producción pues es el estado que menos aporta en esta actividad (menos del 1% en promedio del 2006 al 2011 de producción pesquera) (Tapia, 1999).

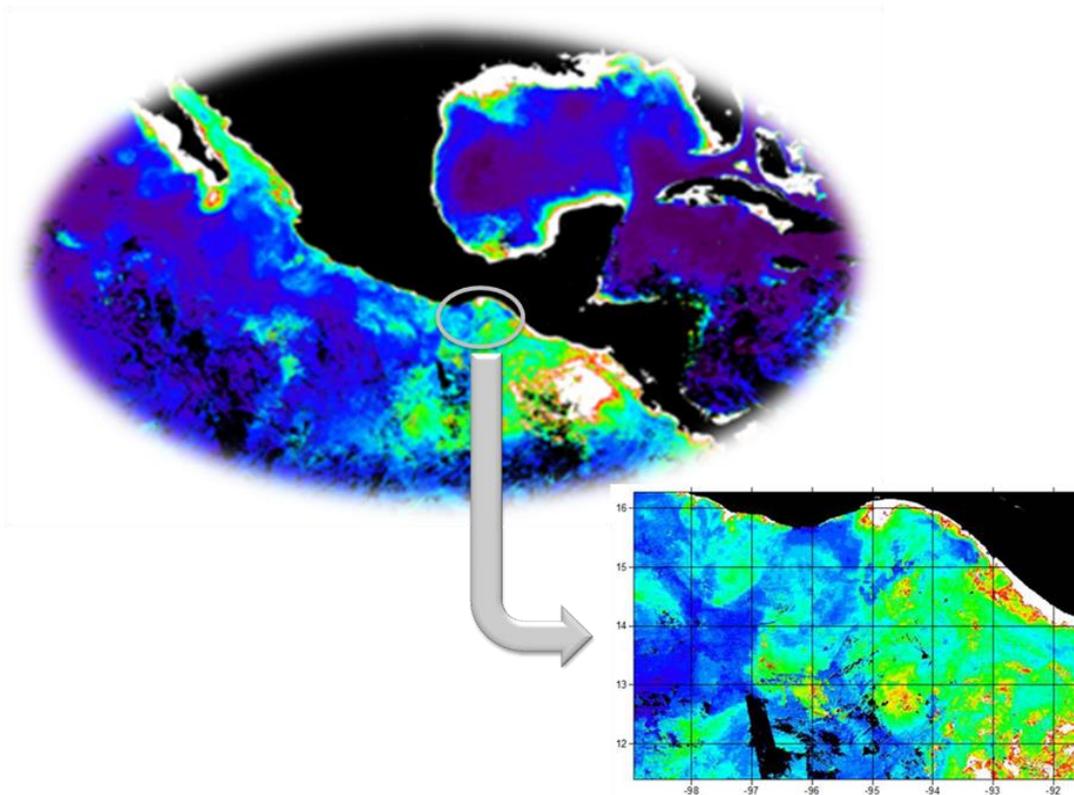


Fig. I.2.-Imagen del área de estudio en el Golfo de Tehuantepec y áreas adyacentes, los colores indican la concentración de clorofila *a* de 0.1 mg/m³ color azul a 5 mg/m³ color rojo, lo observado de color blanco son concentraciones mayores a 5 mg/m³ debido a que existen épocas en las que se encuentran en la superficie plantas acuáticas que reflejan la clorofila *a* dando como resultado una concentración mayor a la requerida para el océano. (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products).

La pesca ofrece empleo e ingresos que las personas utilizan para comprar otros alimentos, incrementando directamente el suministro de alimentos. Las especies de captura en esta entidad es el camarón, la cual parte de su poca producción es de exportación, mientras que el producto pequeño, se canaliza al comercio regional o a la capital del estado. Esta actividad se encuentra localizada en la región del Istmo, principalmente en la zona del Puerto de Salina Cruz (INAPESCA, 2011).

Existen estudios del Golfo de Tehuantepec (GT), que describen los procesos generales que se producen en el golfo y la forma en que determinan los patrones de distribución de los recursos bióticos. Esta región a menudo presenta una elevación de la termoclina y usualmente se manifiesta con temperaturas superficiales más bajas que en las aguas adyacentes. La respuesta del océano en el GT al forzamiento de vientos del norte ha sido estudiada mediante observaciones, sensores remotos y modelos numéricos. Cerca de la costa las corrientes costeras muestran aguas que convergen hacia la cabeza del golfo (Alvarez et al, 1984; Trasviña et al, 1995).

La principal característica del clima en el GT es la variabilidad de los vientos a lo largo del año. Durante el verano, el movimiento hacia el norte de huracanes y tormentas tropicales genera pulsos de viento que se propagan a lo largo de la costa, mientras que durante el invierno intensos vientos ("*tehuanos*") perpendiculares a la costa soplan a través de pasos de montaña del sur de México y América Central (Trasviña & Bardon, 1997). La respuesta del océano ante esta situación es rápida, con un descenso del nivel del mar sobre la costa descenso que está en fase con la escala temporal de variación del viento (Trasviña et al, 1995). El abordamiento en la capa superficial ocasiona un descenso en temperatura de hasta 10°C en menos de un día (Barton et al, 1993). El agua que emerge a la superficie cerca de la costa es acarreada en chorros de agua fría a lo largo de cientos de kilómetros mar adentro. La mezcla turbulenta del viento propicia aún más el descenso de temperatura de la capa superior en escala similar a la ocasionada por la surgencia costera. Los chorros de

agua fría que emergen de la costa eventualmente desarrollan giros anticiclónicos de mesoescala (100 - 500 Km) que se propagan hacia el oeste (Tapia et al, 2007). Las aguas profundas son ricas en nutrientes que incluyen nitrato y fosfato, que son producto de la descomposición de materia orgánica hundida desde las aguas superficiales. Cuando es traída a la superficie, estos nutrientes son utilizados por el fitoplancton, junto con el CO₂ (dióxido de carbono) disuelto y energía solar para producir compuestos orgánicos a través del proceso de fotosíntesis.

La temperatura promedio anual de la superficie del mar en el GT es de 25-30°C. El estrato superficial del mar, térmicamente homogéneo o casi homogéneo, tiene un espesor de 30 a 70 m en esta región, lo que implica que la termoclina permanente sea somera y su profundidad promedio es alrededor de 50 m aproximadamente (Stumpf, 1975), un poco menos profunda en invierno (30 m) y un poco más en verano (70 m), esto quiere decir que durante el invierno, agua de 22°C o más fría se encuentra normalmente a unos 40m de la superficie en toda el área de estudio. De esta manera cuando los vientos “tehuano” aparecen, el agua superficial arrastrada por el viento se suple necesariamente con agua subsuperficial y agua superficial lateral. El agua subsuperficial que por la fuerza del viento asciende a la superficie, es significativamente más fría y viene de profundidades de hasta 100m, lo que significa que los “tehuano” transfieren al océano tanta energía mecánica que la turbulencia generada en el estrato superficial del mar (capa de mezcla) eventualmente alcanza profundidades de decenas de metros, forzando la participación de aguas profundas, cuya temperatura es hasta 10°C más fría, en los movimientos de compensación vertical y desplazamiento horizontal. Este fenómeno se denomina “surgencia eólica”, fácil de detectar y localizar debido a que la temperatura de la capa superficial del mar desciende varios grados centígrados (Gallegos & Barberán, 1998). Cuando los vientos “tehuano” pierden fuerza se reinicia el calentamiento progresivo del agua superficial, y pausadamente desaparecen los vestigios de la surgencia, por lo tanto, en pocas semanas se restablece la

compleja circulación superficial del GT y de las aguas adyacentes (Stumpf y Legeckis, 1977; Gallegos et al, 1986, 1988).

Los sistemas de vientos se combinan con la dinámica oceanográfica para producir dos esquemas ambientales extremos: en verano dominan las condiciones tropicales con la Corriente Costera de Costa Rica (CCCR); pero en invierno, esta misma corriente es débil y las características oceanográficas están determinadas por los eventos locales de viento, calentamiento solar y lluvia (Molina-Cruz & Martínez-López, 1994; Lluch-Cota et al, 1997 Trasviña et al, 2003).

Según Reyes y Mejía-Trejo (1991), el GT es una zona de tormentas tropicales por la gran densidad de perturbaciones que ahí se presentan, esto es debido a que la época de los ciclones es primordialmente de mayo a noviembre, pero en agosto y septiembre tienen la mayor frecuencia (Lluch-Cota et al, 1997) También se ha demostrado que la concentración de la Chl_a en la superficie se incrementa a raíz de los huracanes, ciclones y tormentas tropicales, registrando un aumento mayor en el lado derecho y la magnitud de la respuesta depende de la fuerza del mismo fenómeno (Hanshaw, et al 2008). Los resultados de fuertes vientos en el Golfo de Tehuantepec, muestran una exportación en alta mar de materia orgánica, especialmente durante episodios que generan remolinos, ocasionando un flujo mayor de carbono terrestre al sur del Golfo durante dichos eventos (Samuelsen & O'Brien, 2008).

Según SAGARPA (2011), la producción pesquera de enero a julio de 2010, los volúmenes de captura cayeron 14.2% respecto al mismo periodo de 2009, asociados al impacto del fenómeno "El Niño", particularmente en la pesca de sardina, que es la principal especie pesquera por volumen, esto es debido, a que la productividad biológica tiende a ser suprimida a lo largo de la costa en años El Niño, por lo que el efecto en el intercambio de materia orgánica en la plataforma es difícil de deducir (Samuelsen & O'Brien, 2008).

1.6 Planteamiento del problema

La pesca es una actividad económica importante para México, sin embargo enfrenta grandes retos, principalmente por el asentamiento de comunidades humanas que se establecen en los litorales de los mares mexicanos y de los cuerpos de aguas interiores. En el estado de Oaxaca, la pesca es una actividad que en otros tiempos tuvo relevancia, sin embargo, en la actualidad las cooperativas viven una fuerte descomposición, además de carecer de infraestructura para conservar la producción (menos del 1% en promedio del 2006 al 2011 de producción pesquera), esto se ha observado en la zona costera como el golfo de Tehuantepec, región interesante, desde el punto de vista meteorológico y oceanográfico, por presentar, principalmente, fenómenos de surgencia o movimientos verticales. Este sistema, productivo y dinámico, cuenta con una gran variedad de pesca de especies de importancia comercial, uno de ellos es el huachinango, especie objetivo, a la cual se dirige el esfuerzo pesquero, debido a que tiene alta demanda en el mercado y por lo tanto, ejerce un mayor ingreso al pescador (Espino et al, 2006).

Dado que hace tiempo, el éxito de un viaje de pesca dependía frecuentemente de la experiencia del pescador, actualmente se han desarrollado, bajo esa misma percepción, nuevas herramientas que han resultado en la ciencia moderna como percepción remota, sin otro objetivo más que la obtención de información acerca de un objeto o evento sin estar en contacto físico con él. Esta herramienta es valiosa en la caracterización del medio ambiente marino y costero, involucrando la actualización de cartas de navegación con datos de línea de costa y batimétricos, el mapeo de humedales, la identificación de plantas marinas, tipos de sedimentos en las zonas someras e intermareas y el monitoreo de arrecifes coralinos. También es utilizada en la observación de patrones de turbidez (debido a materiales orgánicos e inorgánicos), corrientes, mezcla de agua dulce y salada y detección de vientos, entre otros, además proporciona un mejor entendimiento del medio físico como auxiliar en el

diagnóstico de los fenómenos que soporta la actividad biológica y establece la línea de base sobre la cual eventos meteorológicos pueden ser medidos.

Los datos obtenidos por medio de imágenes de satélite se pueden utilizar en entornos más generales para llevar a cabo análisis de correlación o regresión de componentes principales.

Los pronósticos en tiempo real, se producen con datos de modelos históricos, con la suposición de que en esta técnica las relaciones históricas entre patrones de diferentes escalas se mantendrán bajo cambio climático. Por lo tanto, la herramienta adecuada para pronóstico climático (estacional) es el Climate Predictability Tool (CPT, por sus siglas en inglés), el cual utiliza campos de anomalías de temperatura con la precipitación de una localidad, o como se realizó en este estudio, con la Chlo_*a*.

Por último, existen estudios, que bajo modelos estadísticos, presentan un papel importante en el control de procesos de los ecosistemas marinos y su respuesta al cambio climático, (ejemplo el ciclo del carbono), mostrando que es posible ajustar los modelos con y sin dependencia de la temperatura con la distribución de trazadores biogeoquímicos, que por sí solos, no parecen proporcionar información suficiente para una proyección más realista porque el fitoplancton marino se controla principalmente por la disponibilidad de nutrientes y suministro de luz (Taucher & Oeschler, 2011).

1.7 *Objetivos*

Considerando que la actividad pesquera contribuye de manera importante en la alimentación, dada la demanda creciente de recursos pesqueros y la necesidad de explorar los recursos marinos de una manera efectiva desde el punto de vista de costos y aplicación de nuevas herramientas, los objetivos de este estudio son los siguientes:

General

- Identificar los efectos de la variabilidad del clima sobre la productividad pesquera del océano con comportamientos atmosféricos en el golfo de Tehuantepec.

Particulares

- Evaluar los datos atmosféricos del sensor AQUA proveniente del satélite MODIS (<http://modis.gsfc.nasa.gov>).
- Construir una base climatológica en punto de malla para caracterizar la variabilidad de la clorofila_ *a* debido al impacto de fenómenos atmosféricos (Tiempo meteorológico, “Nortes”, huracanes, El Niño y la variabilidad climática etc).
- Describir la distribución y abundancia de dos especies de huachinangos de la familia *Lutjanidae* (*Lutjanus peru* y *L. guttatus*) y su relación con los fenómenos atmosféricos del Pacífico Mexicano.

1.8 Estructura de la tesis

En este primer capítulo se presenta una introducción y antecedentes de como la percepción remota ayuda a visualizar la productividad en el océano y su aplicación en la pesca para localizar puntos de referencia en donde se distribuyan especies de importancia comercial como el Huachinango. También se observa cómo influye la formación de un fenómeno meteorológico en la productividad del mar, modificando todo su entorno. Por lo tanto, para justificar el planteamiento y objetivos del presente trabajo, toda la información adquirida se enfocara en la región del Golfo de Tehuantepec, Oax., Méx.

En el segundo capítulo se describen la obtención y procesamiento de los datos utilizados para incorporarlos en la herramienta de predicción climática CPT (Climate Predictability Tool desarrollado por el IRI) por medio de la correlación de las variables de temperatura y Clorofila_a.

En el tercer capítulo se discuten los resultados obtenidos como un pronóstico de productividad para la zona mencionada.

Finalmente, en el cuarto capítulo, se presentan las conclusiones considerando la necesidad en profundizar más en el análisis de las cuestiones climáticas con ayuda de imágenes satelitales para desarrollar un plan de trabajo a futuro.

Para asociar los efectos de la variabilidad del clima, se aplica un enfoque innovador mediante modelos estadísticos, (como el CPT) junto con el procesamiento de imágenes satelitales, además, de un monitoreo a largo plazo de fenómenos meteorológicos y climáticos que pueden ser de utilidad para ubicar las áreas de mayor productividad.

2.1. Imágenes satelitales

La teledetección permite observar la frecuencia de un evento con el uso de datos satelitales relacionados con las variables atmosféricas, oceanográficas, biológicas, vegetación y otras, además de entender los cambios que pueden conducir a graves peligros debido a la mayor intensidad de las tormentas, el aumento del nivel del mar, los monzones, la sequía, las inundaciones y eventos meteorológicos extremos.

Los sensores ópticos para detectar el color del océano en los satélites, proporcionan, como ejemplo, datos significativos sobre las concentraciones de clorofila en la superficie, y su interpretación se basa a partir de instrumentos con bandas espectrales que pueden detectar elementos químicos y biológicos que contribuyen a las variaciones en el color ofreciendo información adicional útil.

2.2. Imágenes MODIS del sensor AQUA

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), es un instrumento científico lanzado en órbita por la NASA en 1999 como parte de la misión *Earth Observing System*, a bordo del satélite Terra (EOS AM) y en 2002 a bordo del satélite Aqua, ambos con frecuencia de paso diaria (tanto diurna como nocturna), una sensibilidad radiométrica de 12 bits y una resolución espacial de 1km (fig. II.1).

Entre los objetivos principales de este instrumento, se encuentran:

- Medición de temperatura de la superficie (suelo, océano)
- Detección de incendios
- Color del océano (sedimentos, fitoplancton)
- Cartografía de la vegetación global
- Detección de cambios
- Características de la nubosidad
- Concentraciones de aerosoles

MODIS capta datos en 36 franjas espectrales en longitudes de onda de 0.4 a 14.4 μm (entre el rango visible y el infrarrojo térmico) dos bandas poseen una resolución espacial de 250 m; cinco de 500 m y 29 de 1 km. Los datos MODIS juegan un papel importante en el desarrollo de modelos terrestres y de predicción de cambios globales, incluyendo cambios en la cobertura de nubes, procesos que ocurren en los océanos, en la Tierra y en la atmósfera más baja, siendo muy útil para la toma de decisiones sobre la protección del medio ambiente (<http://modis.gsfc.nasa.gov>).

MODIS cuenta con 44 productos de datos estándar, por lo que su gran resolución espectral extiende su uso a muy diversas aplicaciones, como usos de suelo, incendios forestales, inundaciones, sequías, clima, cubiertas de nieve o hielo, datos de temperatura, vapor de agua, etc., (<http://lpdaac.usgs.gov/main.asp>).

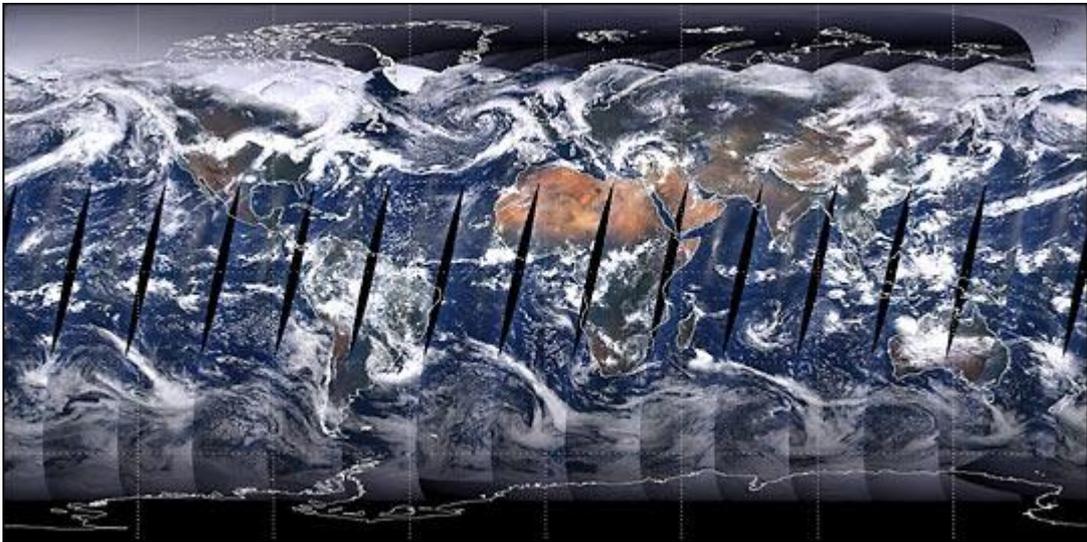


Fig. II.1. Imagen global de MODIS con una resolución de 500m, proporcionada por la NASA. (Fuente de datos: <http://modis.gsfc.nasa.gov>)

2.2.1. *Clorofila_a*

Según Acuña et al (2008), la clorofila_a (Chlo_a) es un indicador de la biomasa del plancton de la columna de agua y se utiliza como una entrada a los modelos de la producción primaria o para rastrear corrientes y plumas oceanográficas (fig. II.2).

La Chlo_a de la superficie del mar puede ser medido en el rango espectral visible del 0.4-0.7 μm . La concentración de la Chlo_a en una muestra de agua permite una estimación de la concentración de fitoplancton e indirectamente de la actividad biológica.

Los pigmentos de Chlo_a tienen una firma espectral específica, ya que absorben en las longitudes de onda correspondientes al azul (455-492 nm) y al rojo (622-700 nm) del espectro, así como una fuerte reflectancia en el color verde (492-577 nm) afectando el color del océano (<http://modis.gsfc.nasa.gov>).

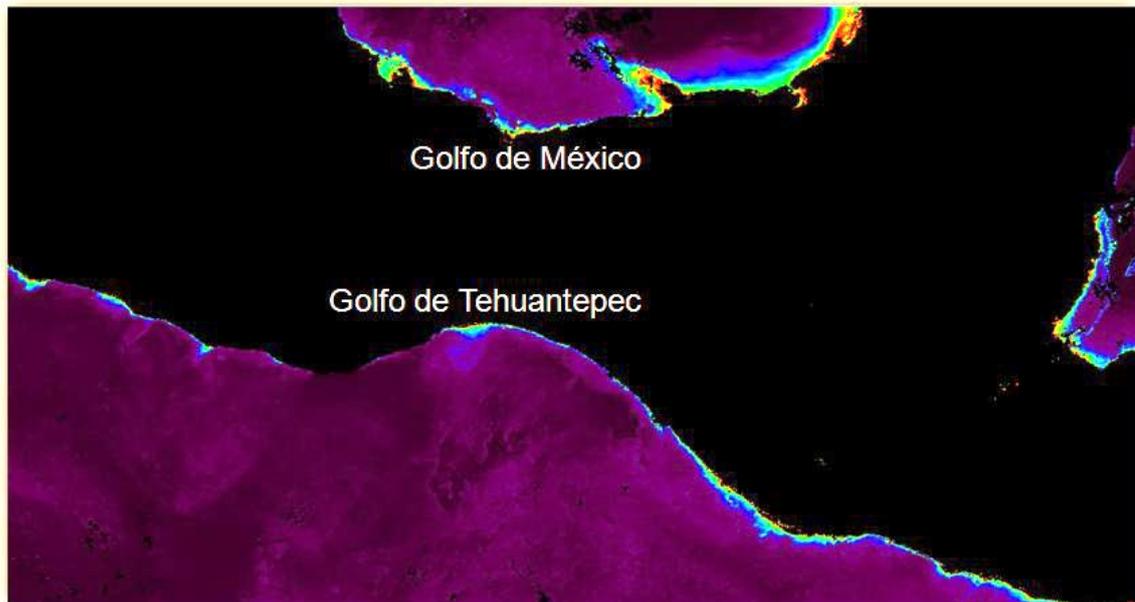


Fig. II.2. Imagen MODIS AQUA de concentración de clorofila (de 0.1 mg/m^3 color morado a 5 mg/m^3 color rojo) del mes de julio de 2002 con 1km de resolución. El continente se observa en color negro. (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products).

2.2.2. *Temperatura superficial de mar*

La temperatura de la superficie del mar es un parámetro relevante para cuantificación de los intercambios océano-atmósfera, y eventualmente puede usarse como trazador del movimiento superficial. Este tipo de observaciones ofrecen un valor incalculable para estudios oceanográficos, siendo de utilidad como indicador de la presencia de fenómenos como “El Niño o La Niña”, los cuales afectan el clima de la costa dando lugar a una serie de daños que se concentran en la infraestructura vial y agrícola (fig.II.3) (Alburqueque et al, 2008). En este estudio se tomó en cuenta la TSM nocturna para evitar que el valor de temperatura aumente por la mañana debido a la radiación solar.

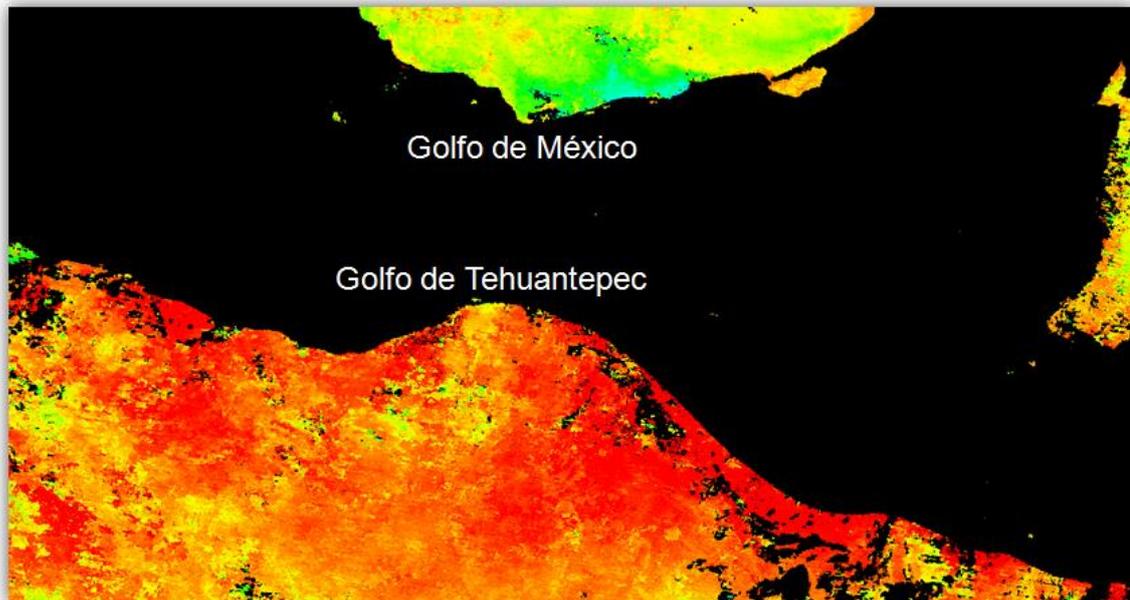


Fig. II.3. Imagen MODIS AQUA de Temperatura superficial del mar nocturna (de 21° de color azul -31°C de color rojo) del mes de julio de 2002 con 1km de resolución. El continente se observa de color negro. (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products).

2.3. Cálculo de la productividad en el mar en función de fenómenos meteorológicos y oceánicos

Estudios anteriores discuten cómo, la dinámica de la comunidad fitoplanctónica está determinada por el forzamiento físico entre variables que afectan la productividad del mar (Espinosa-Carreón & Valdez-Holguín, 2007). Una de esas variables es el viento que funciona como una fuente de mezcla y transporte vertical de nutrientes en el océano.

2.3.1. Mezcla vertical producida por los vientos que influye en la variabilidad de la clorofila

La interacción existente entre el océano y la atmósfera sobre la presencia de eventos de mezcla vertical por la acción de los vientos, da como efecto el afloramiento del aporte de nutrientes sobre las aguas costeras del Golfo de Tehuantepec. De esta manera las alteraciones físicas y químicas producidas en las aguas superficiales durante el afloramiento originan la presencia de redes tróficas cortas y de eficiencia relativamente baja, así como

altos niveles de biomasa fitoplanctónica y elevada producción primaria (Arévalo-Martínez & Franco-Herrera, 2008), generando remolinos como producto de la surgencia o mezcla vertical, dadas, esencialmente, por la intensidad y la dirección del viento a lo largo de la costa (Flores-Vidal et al, 2011). En este estudio, se utilizaron los datos de viento y surgencia del sensor SeaWinds (<http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/griddap/>). Este sensor de microondas de doble haz, se encuentra a bordo del satélite QuikSCAT y permite medir el efecto de la reflexión o dispersión producida durante la exploración de la superficie de la Tierra de un avión o un satélite. Está diseñado, específicamente para calcular la magnitud y dirección del viento de superficie sobre el océano, vitales para estudios de interacción océano-atmósfera y circulación oceánica. Los datos de surgencia y de las componentes (zonal y meridional) del viento se encuentran en una resolución espacial de 25 km y en un compuesto de tres días como resolución temporal (figs. II.4 y II.5), sin embargo, también existen datos diarios, semanales, quincenales y mensuales.

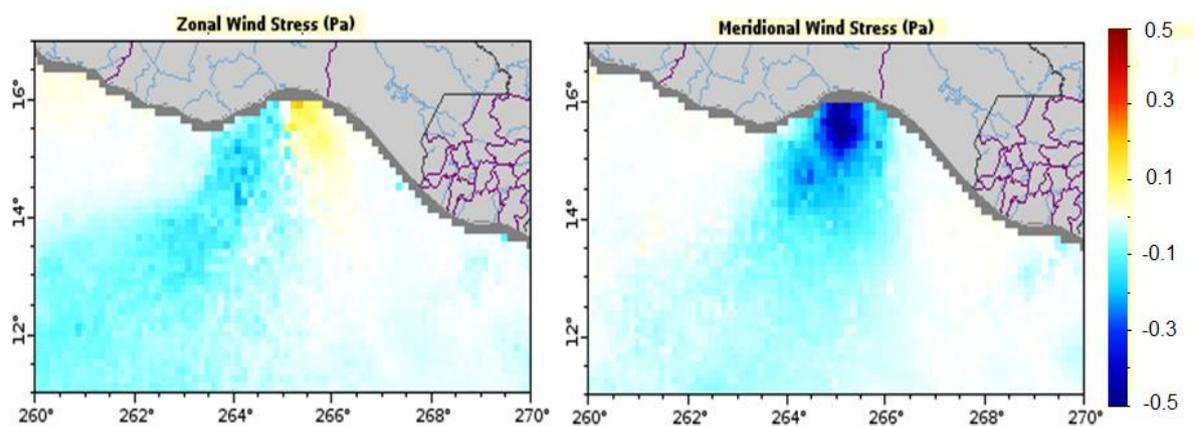


Fig. II.4 Imagen de las componentes zonal y meridional del estrés del viento, del día 19 de Noviembre de 2009, a las 12Z en Pascales. Cortesía del CoastWatch NOAA. (<http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/griddap/>).

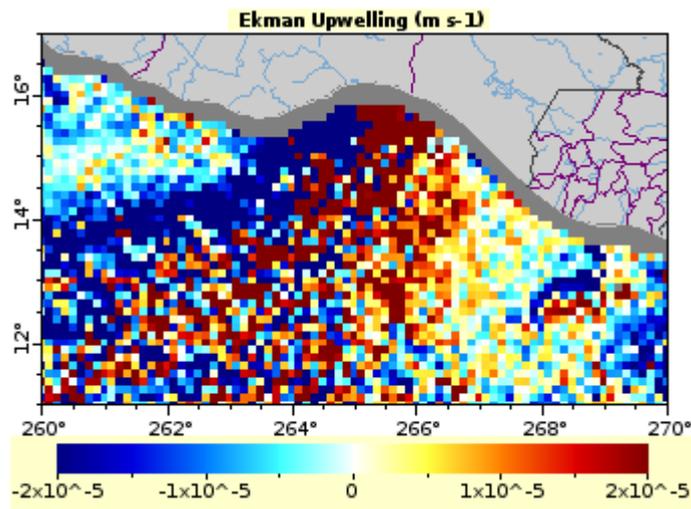


Fig. II.5 Imagen de surgencia (m/s), del día 19 de Noviembre de 2009, a las 12Z. Cortesía del CoastWatch NOAA. (<http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/griddap>).

2.3.2. *Procesamiento de imágenes MODIS*

Los datos de Chlo_a y TSM fueron obtenidos de la página ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products/ desde enero del 2003 a diciembre de 2010 con 1km de resolución. El nivel de procesamiento de las imágenes corresponde al nivel 3 de pre procesamiento (L3), que son productos de valor agregado derivados de variables geofísicas mapeadas. Dichas imágenes obtenidas en formato HDF (Hierarchical Data Format), se procesaron mediante el programa ENVI (The Environment for Visualizing Images) versión 4.5.

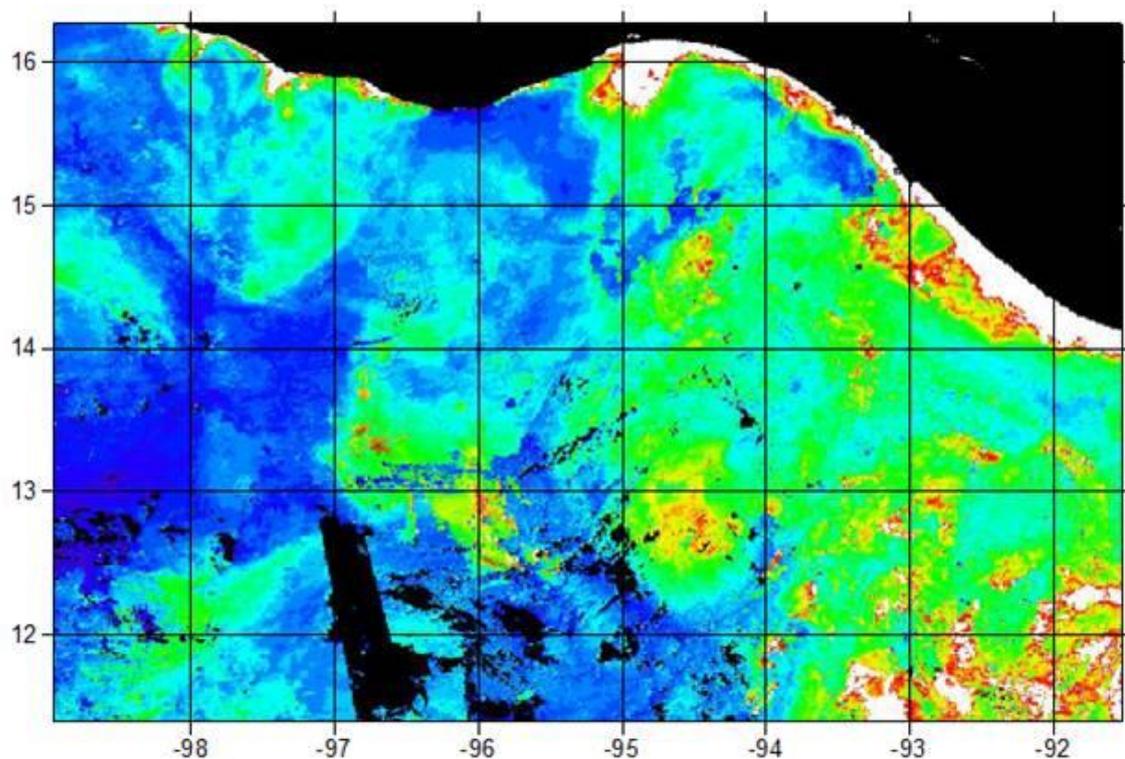


Fig. II.6 Área de estudio en el Golfo de Tehuantepec, los colores indican la concentración de clorofila_ *a* de 0.1 mg/m³ color azul a 5 mg/m³ color rojo, lo observado de color blanco son concentraciones mayores a 5 mg/m³ debido a que existen épocas en las que se encuentran en la superficie plantas acuáticas que reflejan la clorofila_ *a* dando como resultado una concentración mayor a la requerida para el océano. (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products).

Una vez identificada el área de estudio (fig. II.6) en todas las imágenes, se realizó un recorte para obtener únicamente la zona de interés con las coordenadas 11-16° N y 91-98° W que delimitan el Golfo de Tehuantepec y alrededores.

2.3.3. *Correlación de Clorofila_ *a* (Chlo_ *a*) y Temperatura Superficial del Mar (TSM)*

La concentración de la Chlo_ *a* presente en el agua es afectada por la temperatura superficial del mar que obedece a un patrón estacional (Espinosa-Carreón & Valdez-Holguín, 2007). No obstante, puede haber influencia de otros factores ambientales como los eventos meteorológicos (ej. los vientos) y los procesos oceanográficos (ej. las surgencias costeras). Para determinar la relación entre la TSM y la Chlo_ *a*, se utilizó un diagrama de

dispersión, en donde se muestran los valores de dos variables para un conjunto de datos.

En este caso se tomaron al azar ocho puntos del área estudiada (fig.II.7).

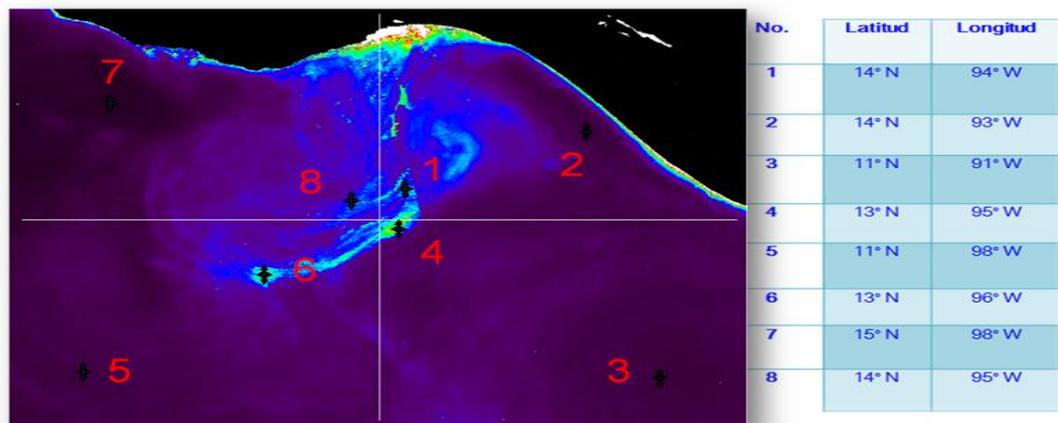


Fig.II.7 Área de estudio con puntos en donde se obtuvieron datos para observar los valores de la temperatura y la clorofila_ *a*. En color azul se observan concentraciones de clorofila de 0.05 a 5.5 mg/m³, el color morado presenta valores menores al 1.0 mg/m³, y el color blanco representa valores mayores al 5.5 mg/m³ (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products).

Los puntos se agrupan alrededor de una línea imaginaria (línea de tendencia) que pasa por el centro de la masa de los mismos. Estos casos sugieren que una de las variables lleva el control de la otra; pero se dan los casos de que los puntos no están lo suficientemente agrupados, como para asegurar que existe la relación, por lo tanto, el control de una de las variables no necesariamente nos llevará al control de la otra. Sin embargo, en ambos casos el parámetro de control es la **variable independiente = eje x** (en este caso es la temperatura superficial), y la variable medida o la **variable dependiente = eje y**, (clorofila_ *a*). Se dice que la correlación es positiva, si el valor de “y” (eje vertical) tiende a aumentar cuando aumenta el valor de la variable “x” (eje horizontal), pero, si el valor de “y” tiende a disminuir cuando aumenta el valor de “x” la correlación es negativa (fig II.8).

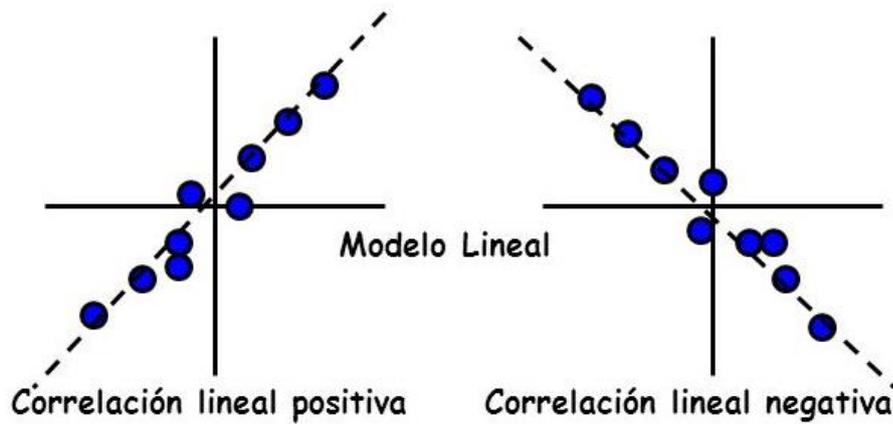


Fig.II.8 Figura en la que se muestran tipos de correlaciones en modelo lineal.

2.4. *Uso de la herramienta de predicción climática (CPT) para pronósticos de clorofila_a*

Para realizar una base climatológica, y de esta manera estudiar la variabilidad de la clorofila_a, se empleó el esquema de escalamiento estadístico conocido como Climate Predictability Tool (CPT), diseñado para realizar pronósticos climáticos estacionales que permite relacionar patrones de gran escala con condiciones regionales del clima. Este software, es una aplicación computacional libre para Windows y Linux (fig. II.9), desarrollado por el Instituto Internacional de investigaciones para el Clima y la Sociedad (IRI por sus siglas en inglés). Se utiliza como corrector de errores sistemáticos de salidas de GCM mediante la técnica conocida como *Model Output Statistics* (MOS) (Glahn H. R. & D. A. Lowry, 1972). Esta técnica parecida a la reducción de escala, relaciona patrones espaciales en un campo independiente y otro de respuesta. La parte MOS, corrige errores en las salidas de modelos y se utiliza como predicción para la construcción de un modelo de pronóstico climático estacional validados y genera pronósticos mediante campos de la TSM con datos actualizados (Glahn H. R. & D. A. Lowry, 1972).

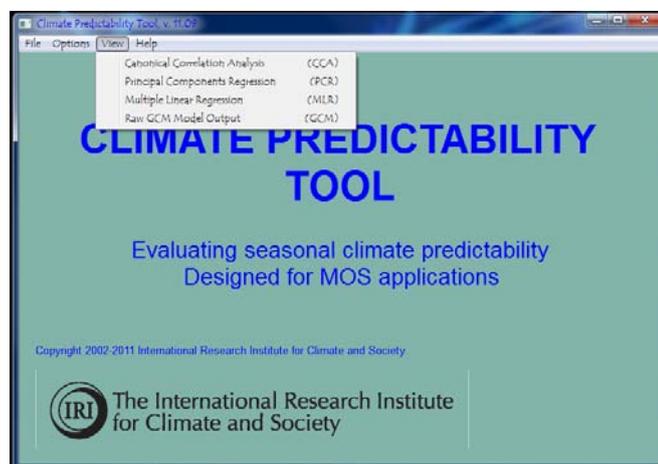


Fig. II.9 Pantalla de inicio de *Climate Predictability Tool* (CPT), para Windows

El esquema CPT, permite aplicar las técnicas estadísticas de reducción de escala a través de regresión por componentes principales (PCR, por sus siglas en inglés), análisis de correlación canónica (CCA, por sus siglas en inglés) y regresión múltiple a cualquier variable, haciendo accesibles otros resultados como estadísticas básicas, funciones Empíricas Ortogonales (EOF's, por sus siglas en inglés) y patrones canónicos a través de las mismas EOF's. El esquema de regionalización, mediante el CPT, cuenta con la aplicación de diferentes técnicas estadísticas como estandarizar los campos de los GCM, muestrear los datos, recalibrar las ecuaciones en un segundo periodo de calibración, normalizar los campos, sustituir valores faltantes o aplicar diferentes técnicas para derivar las EOF's, todo con el objeto de optimizar las ecuaciones de reducción de escala (ecuaciones de regresión). El CPT utiliza datos mensuales o estacionales de un periodo histórico de simulación del GCM (periodo de calibración), y tiene la capacidad de construir una ecuación de transferencia para cada mes, estableciendo las funciones de transferencia del campo de alta resolución al de baja resolución para cada uno. Antes de calcular las EOF's, los datos son muestreados para resolución diaria u horaria que proveen la información necesaria para realizarlo, pero contienen una inadecuada simulación de la

variabilidad local, subestimando eventos extremos por lo que la muestra es relativamente pequeña en la escala que tiene lugar el cambio climático.

Por otra parte, el CPT fue diseñado para regionalizar pronósticos estacionales (unos cuantos meses de tiempo de pronóstico), esta característica se encuentra determinada por la forma en que construye las ecuaciones de regresión; en ellas el CPT arregla las EOFs del sistema climático reproducidos por el GCM de tal forma que expliquen la mayor varianza del campo de alta resolución, con su esquema normal elimina el primer EOF. Las EOF's también son conocidas como modelos de variabilidad. El primer modo de variabilidad de los datos corresponde al valor promedio, esto es, el campo climatológico característico. En pronósticos estacionales el primer EOF contiene información irrelevante, ya que los modos de interés son los que determinan las anomalías, o sea el segundo, tercero, cuarto, etc. Sin embargo la componente temporal del primer EOF contiene el comportamiento histórico de todo el campo y por lo tanto, la tendencia. La tendencia es la componente base de los escenarios de cambio climático, al hacer proyecciones de más largo periodo es necesario considerarla; en esta componente o modo estriba la diferencia entre las funciones de transferencia de pronósticos estacionales y climáticos. Incluso, para evaluar las proyecciones de los GCM de cambio climático es más importante capturar la componente de tendencia del primer modo, que las siguientes componentes, ya que en ésta se evalúa la sensibilidad del sistema climático reproducido por el GCM ante el forzante radiativo.

2.5. Eventos meteorológicos y su influencia en la productividad del océano

El Golfo de Tehuantepec es conocido como una zona de movimientos verticales provocados por "Nortes" (Tehuano), que son vientos intensos de paso de montaña, principalmente en invierno, generando giros anticiclónicos tanto después de un evento como entre eventos sucesivos (Trasviña & Barton, 1997). Por lo que en cada una de las imágenes (tanto clorofila_a y TSM) se obtuvieron datos en dos transectos (fig. II.10), para observar

dónde y cuándo se presenta dicho fenómeno oceanográfico. Al obtener estos datos, por medio del programa ENVI 4.5, se realizó un análisis de medias móviles, el cual suaviza la curva obtenida para analizar las variables fuera de su ciclo anual.

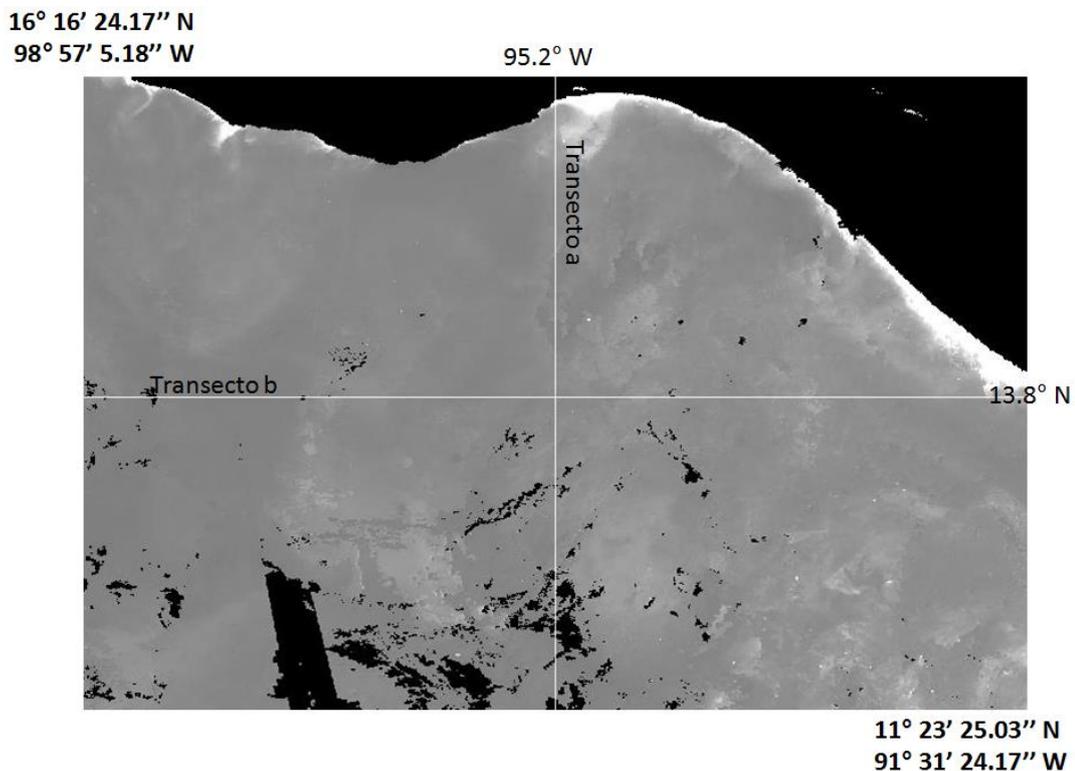


Fig. II.10. Delimitación de los transectos: **a** (95.2°N de latitud) y **b** (13.8°W de longitud) dentro del área de estudio en el Golfo de Tehuantepec y zonas aledañas. (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products).

Se analizó el efecto de los años “El Niño/ La Niña”, bajo la hipótesis de que la productividad aumenta en años El Niño en referencia a la actividad de los “Nortes” (Magaña et al, 2004). Para ello se utilizó el índice ONI (The Oceanic Niño Index), adoptado por acuerdo oficial entre Canadá, México y USA en el año 2005 y utilizado para el monitoreo, evolución y predicción del ENSO (El Niño / La Niña-Southern Oscillation) en el Océano Pacífico. Dicho criterio, es una serie de tiempo de las anomalías de la temperatura superficial del mar, calculadas a partir de mediciones *in situ* efectuadas en la región 3.4 que comprende 5°N – 5° S, y 120- 170° O. El periodo base abarca de 1971 a 2000 y los datos se obtienen con el método de medias móviles aplicado a periodos de tres meses, con esto, es considerado “El

Niño” si la anomalía se encuentra, con una magnitud **mayor o igual** a 0.5°C de temperatura al menos 5 periodos consecutivos. Asimismo un evento “La Niña”, está determinado por encontrarse debajo del umbral de los 0.5°C de temperatura por el mismo periodo de tiempo (fig. II.11).

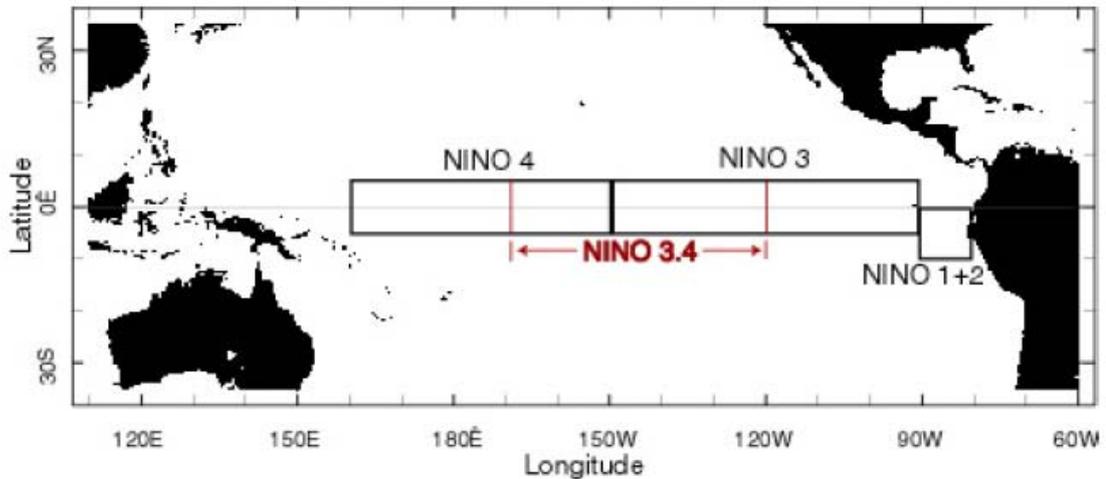


Fig. II.11 Regiones Niño en el Océano Pacífico Ecuatorial (OPE), como conclusión del monitoreo del sistema El Niño/La Niña-Oscilación del Sur (ENSO), tomado del IRI, 2007.

2.6. Caso de estudio: Tormenta Tropical Agatha

La actividad de los fenómenos atmosféricos (ej. un huracán), intervienen en la productividad del océano. Para este estudio se analizó el evento de la Tormenta Tropical Agatha (TTA) en 2010 (fig II.12), bajo la hipótesis de que la TSM disminuye durante la trayectoria de cualquier fenómeno de esta magnitud y produce una mezcla vertical y/o surgencia, que induce el surgimiento de agua rica en nutriente y, por lo tanto, una estimulación en la producción biológica (Liu, et al., 2009).

Al considerar que estos cambios tanto en la TSM, como en la productividad (representada en este estudio por la *Chlo_a*) se desplegaron imágenes semanales de MODIS, *antes, durante y después* de la TTA, presentada del 29 al 30 de mayo de 2010. De esta manera se corroboró la asociación que existe entre dicho evento y producción del mar.

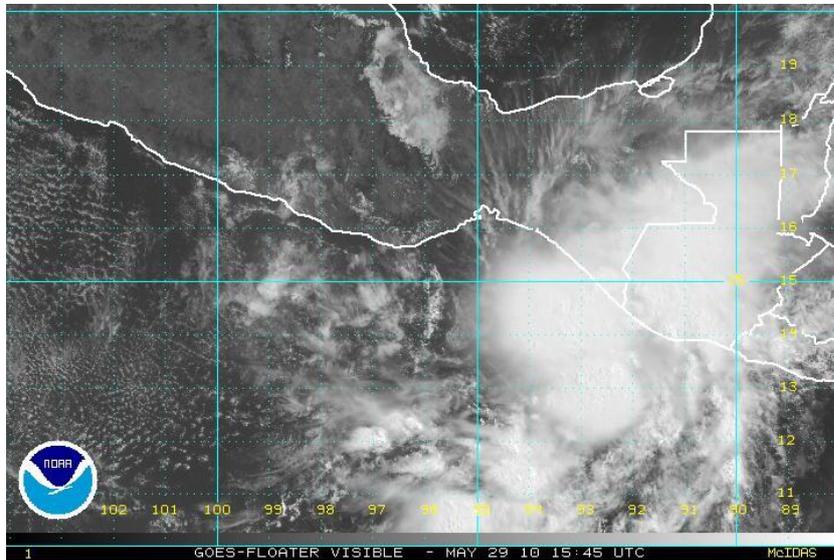


Fig. II.12 Imagen satelital, cortesía de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), en la que se muestra la Tormenta Tropical Agatha tomada el 29 de mayo de 2010.

2.7. *La pesca de huachínango*

Los estudios asociados a estos fenómenos meteorológicos en el Golfo de Tehuantepec, son de mucha relevancia, principalmente por la actividad pesquera, la cual tiene un valor económico, social y alimentario, como parte de una cadena productiva donde se generan empleos directos e indirectos, valor agregado, divisas, materia prima para otras industrias y parte de la seguridad alimentaria. Sin embargo, las tendencias en las capturas de la pesca mundial continúan estabilizadas en los últimos años, a pesar de los incrementos en el esfuerzo de pesca (Tapia, 1999). En este caso solo será bibliográfico, debido a que no se cuentan con datos suficientes para realizar un análisis más detallado.

3.1. Antecedentes

En la actualidad las variables tanto físicas como químicas son susceptibles a la detección y al registro de sus magnitudes con instrumentos montados en los satélites, con la ventaja de su accesibilidad y relativo bajo costo por unidad de registro, lo que ha permitido, además de la creación de bancos de datos, el desarrollo tanto de la oceanografía satelital como de la meteorología satelital que, entre otras cosas, son disciplinas que estimulan el estudio y amplían el conocimiento científico de nuestro sistema climático (Lira, 1987).

Un ejemplo de lo importante que se ha convertido este tipo de investigación se observa en estudios ambientales, en donde se han encontrado que la ocurrencia de los fenómenos del El Niño y La Niña, (eventos de variabilidad climática de gran importancia en el Océano Pacífico Ecuatorial y Central), afectan la productividad primaria en el océano, debido al impacto en las condiciones meteorológicas y en las variables oceánicas, como la temperatura superficial del mar, la clorofila, entre otras. Sus efectos más intensos ocurrieron en los años 1997 y 1998 y otros moderados entre 2002 y 2003. (Lee et al., 2011; Park, et al, 2011).

El sistema de afloramiento del Pacífico Ecuatorial (PE) se caracteriza por ser casi estacionario y tener una surgencia de agua fría impulsada por vientos, esto es, a través de una termoclina poco profunda. El resultado de esto es un gran suministro de nutrientes a la capa superficial, la cual soporta una mayor concentración de clorofila y una gran producción primaria en comparación con aguas circundantes (fig. III.1). Esta mezcla vertical en el PE está sujeta a los cambios importantes que ocurren año tras año, debido principalmente a la variabilidad en el forzamiento físico en respuesta a la ocurrencia periódica de episodios El Niño y La Niña (Uitz et al, 2010).

Como se sabe el fenómeno de El Niño, se asocia con cambios biológicos y físicos en el océano que afectan la distribución de los peces (Lee et al., 2011). El flujo del mar durante este evento provoca que el agua se caliente cerca de las orillas, dando como resultado graves consecuencias económicas, ya que las especies de peces de importancia comercial se alejan de estas zonas costeras hacia las aguas más frías. También existe una disminución en las tasas de fotosíntesis en las zonas eufóticas, es decir, en las capas superficiales del océano que reciben suficiente luz para dar lugar a la fotosíntesis. Esto se traduce en una reducción de la producción del alimento básico (fitoplancton) que conduce a una disminución en la comida para los peces. Cuando esto sucede los animales tienden a migrar en busca de alimentación y, a veces, mueren en las aguas que son demasiado frías para que puedan sobrevivir. Aquellos que no pueden migrar también mueren debido a las temperaturas extremas y a la falta de alimentos (Townsend, 2012).

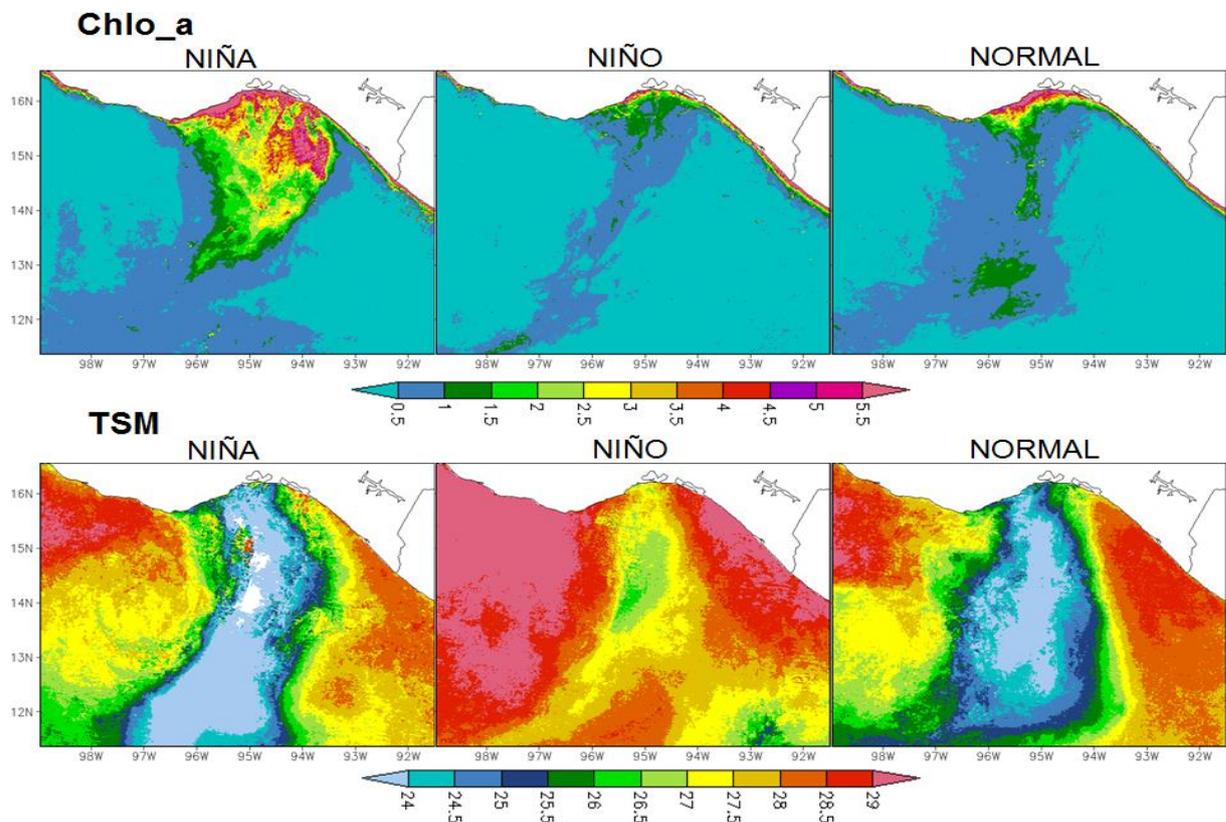


Fig. III.1. Mapas de Clorofila_a (de 0.05 mg/m^3 a 5.5 mg/m^3) y de temperatura superficial del mar (23.5°C a 29°C) tanto para los años con fenómenos de El Niño, La Niña y en años normal, desde el 2003 al 2010. Las áreas blancas que se observan en el mapa de La Niña son por falta de datos. (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products).

A diferencia de El Niño, la presencia del fenómeno de La Niña implica aguas más frías, sin embargo, provoca la dispersión de las pesquerías, resultando más difícil ubicar los recursos para los pescadores. Los efectos en la biología de los peces dependen de la intensidad del mismo evento, debido a que los extremos siempre hacen daño a los organismos vivos que tienen cierto rango de tolerancia para su supervivencia y óptimo desempeño.

3.2. Surgencia

Durante el verano y el otoño el Golfo de Tehuantepec (GT) se caracteriza por la presencia de centros de baja presión casi estacionaria que favorecen la ocurrencia de eventos Tehuanos de larga duración contrario a los meses de invierno y primavera. Sin embargo, durante el verano y en ausencia de viento, se observan remolinos ciclónicos que levantan la termoclina y originan surgencias o enfriamientos costeros. El efecto de los Tehuanos sobre la superficie del océano se considera como el fenómeno principal que origina los remolinos de mesoescala en el GT, proceso físico que se basa en el bombeo de Ekman y el rotacional del esfuerzo del viento. (Filonov & Trasviña, 2000; Trasviña, et al, 2003; Flores-Vidal, et al, 2011; Velázquez-Muñoz, et al, 2011) (fig. III.2).

Durante el otoño, este florecimiento se desarrolla en respuesta al incremento del estrés del viento, con la sugerencia de un mecanismo por el cual se aumenta la producción debido al arrastre de nutrientes mientras se profundiza la capa de mezcla (Lluch et al 1997; Flores-Vidal, et al, 2011). En verano no se observan eventos Tehuanos aunque si remolinos ciclónicos (fig. III.2).

En el invierno, la circulación costera en el GT está fuertemente influenciada por los vientos Tehuanos que causan un descenso en el nivel de la superficie oceánica, un ascenso de la termoclina y por lo tanto mezcla y surgencias importantes en la zona. La Corriente Costera (CCO) seguramente en ausencia del viento, modifica la profundidad e inclinación de la termoclina, haciéndola más profunda cerca de la costa y más somera mar adentro.

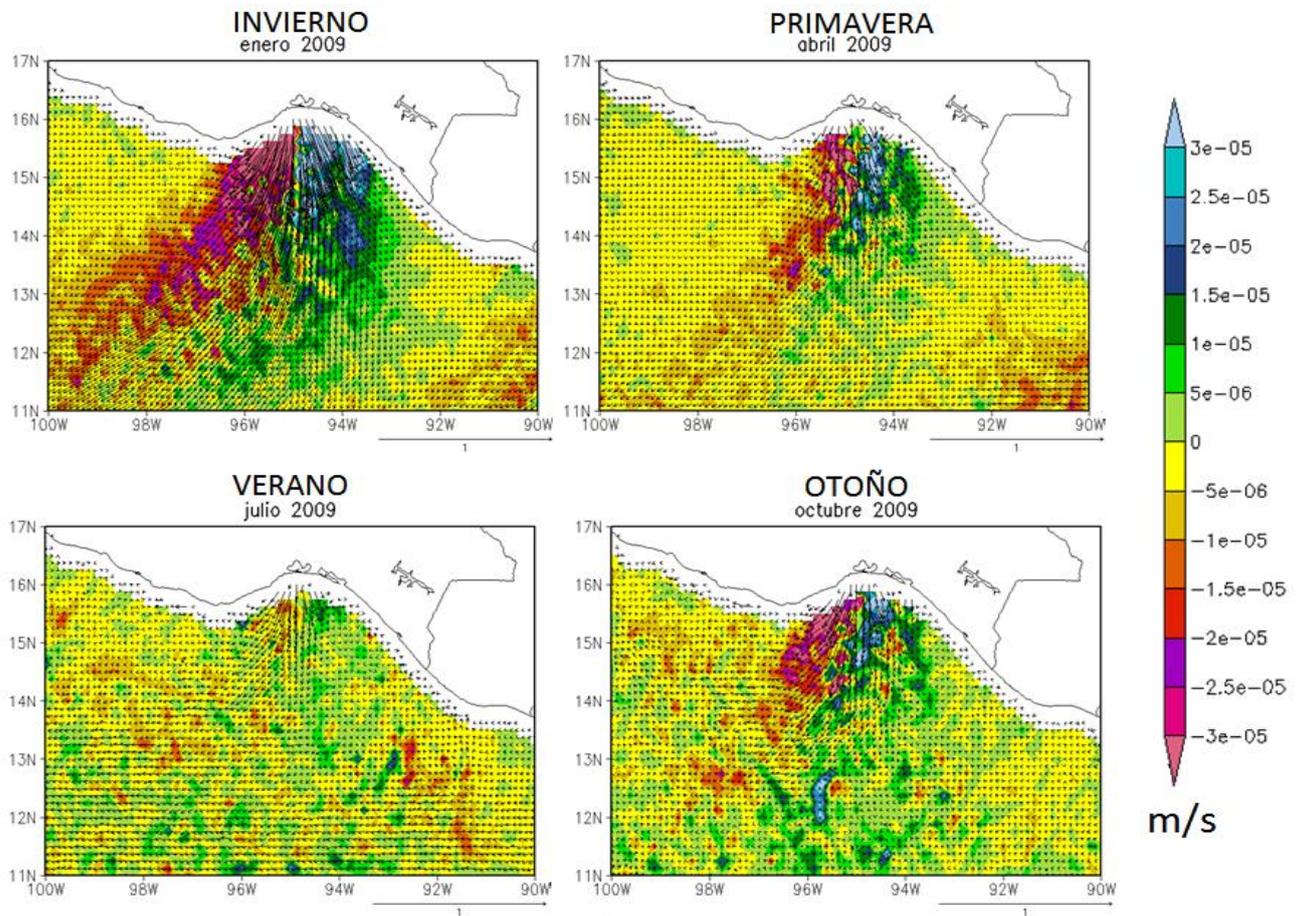


Fig. III.2. Mapas de surgencias (m/s) en el Golfo de Tehuantepec, para las diferentes épocas del año (primavera, verano, otoño e invierno) durante el 2009. (Fuente de datos: <http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/griddap>).

La circulación costera en invierno, después de un evento tehuano, muestra una corriente que fluye de manera persistente de este a oeste a una velocidad promedio de 0.4m/s, esto provoca la entrada de una masa de agua cálida al GT. Esta corriente es muy persistente y se encuentra asociada a una zona de baja variabilidad hacia el lado este, frente a la costa (fig. III.2). Se puede señalar que la circulación costera en el GT está también relacionada con la componente zonal (*componente u*) del esfuerzo del viento y la espiral de Ekman por la acción de la fuerza de Coriolis, esto es, cuando el agua superficial empuja el agua que esta debajo, hacia la derecha (en el hemisferio norte). Mientras la corriente se desvía desde el origen, la velocidad se vuelve cada vez menor y la profundidad a la cual la espiral de Ekman ingresa está determinada por cuán lejos puede penetrar la mezcla turbulenta en el curso de un día, de tal manera que las concentraciones de fitoplancton se incrementan en

grandes áreas debido a la intensificación de la oferta de nutrientes superficial causada por un fuerte viento (Pérez Santos et al, 2010; Flores-Vidal, et al, 2011).

3.3. Temperatura superficial del mar

Según Gallegos et al (2009) la temperatura superficial del mar (TSM) es resultado de una serie de diversos procesos mecánicos, dinámicos y termodinámicos que ocurren en la interface océano-atmósfera, y que se expresan en la superficie del mar, como las surgencias (oceánica, y costera) y las descargas de los ríos (permanentes y temporales) al océano. Las distribuciones térmicas corresponden a procesos oceánicos o meteorológicos de regularidad anual o interanual y también a dimensiones geográficas de escala regional.

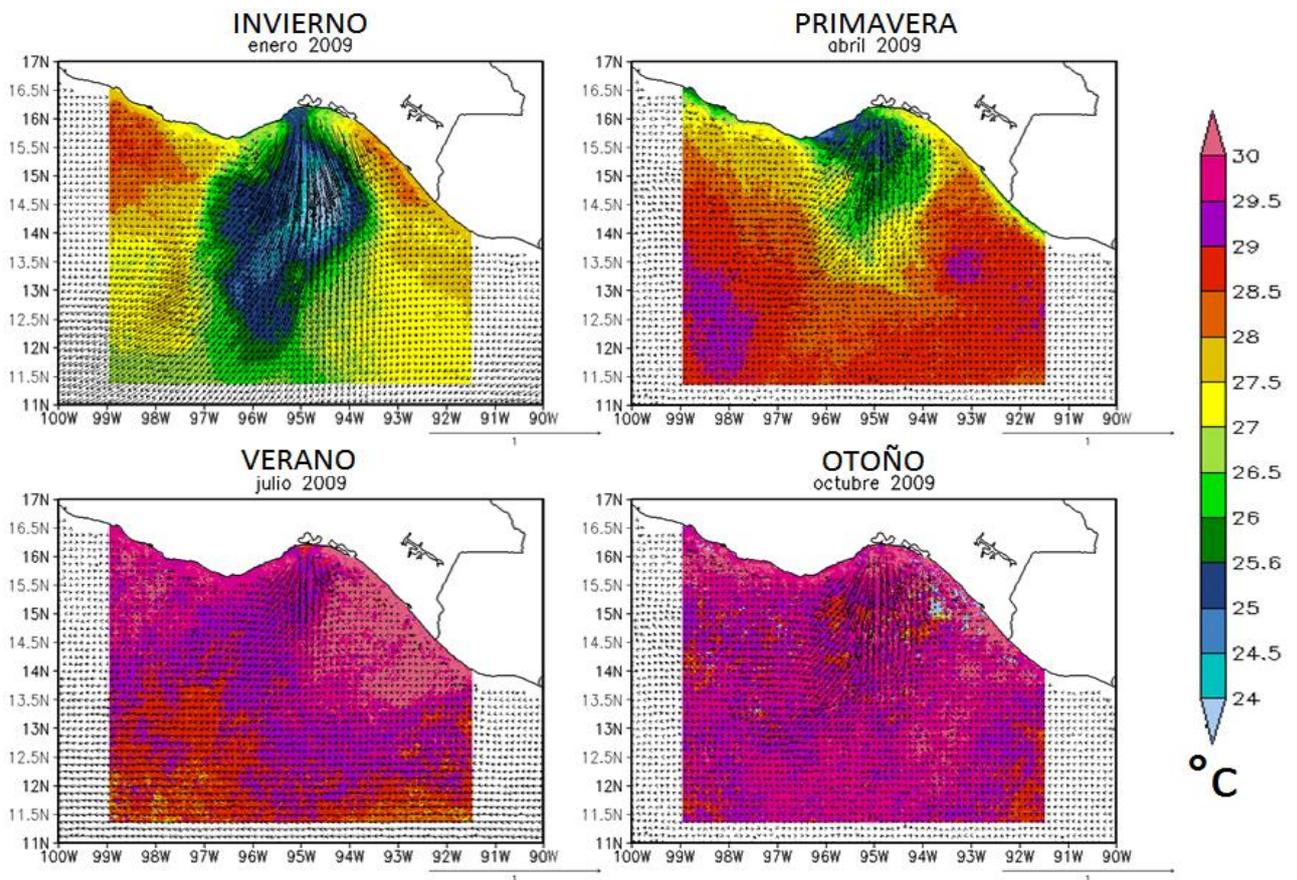


Fig. III.3. Mapas de temperatura superficial del mar (23.5°C a 29°C) en el Golfo de Tehuantepec, para las diferentes épocas del año (primavera, verano, otoño e invierno) durante el 2009. (Fuente de datos: ftp://lectura.avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products).

La TSM (fig. III.3), indica un afloramiento favorable que se produce en otoño y en invierno, lo que impulsa, en general, una alta concentración de nutrientes en aguas superficiales, con la consiguiente alta productividad para el Golfo de Tehuantepec, a lo contrario de cuando este desplazamiento de aguas profundas producido por el estrés del viento ocurre en primavera y dadas las altas temperaturas que en ese momento se presentan, la concentración de clorofila es baja y por lo tanto la zona es muy poco productiva.

3.4. *Clorofila_a*

La formación de remolinos de mesoescala, se identifican en imágenes satelitales (fig. III.4) como zonas de alta concentración de clorofila_a y baja temperatura (Flores-Vidal, et al, 2011).

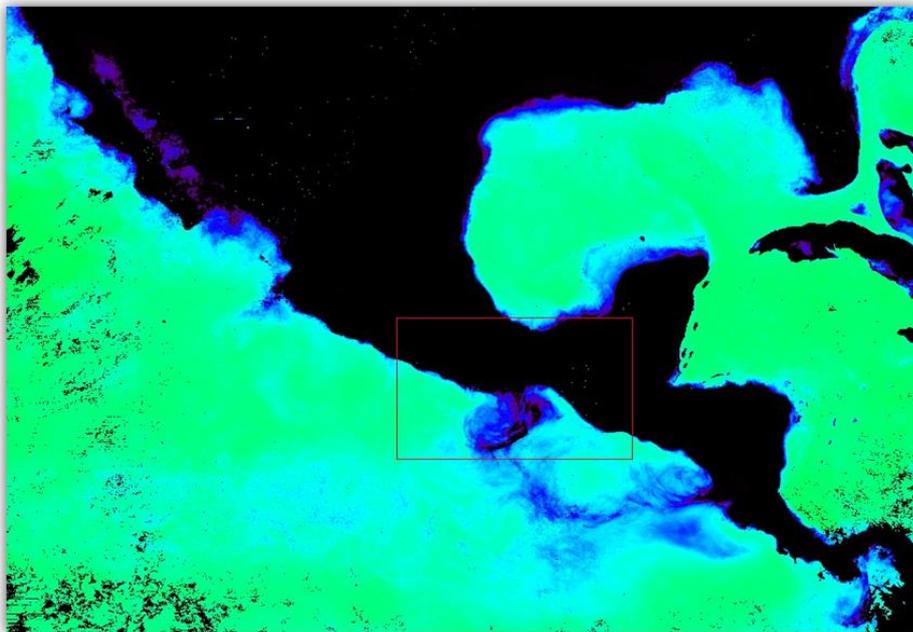


Fig. III.4. Imagen de satélite en la que se observa la concentración de clorofila_a en el Golfo de Tehuantepec, en enero de 2009. (En color verde se encuentran valores de 0.5 a 1 mg/m³ mientras que en color azul, se encuentran valores de 5mg/m³ y en color morado valores mayor a los 5mg/m³, esto es cerca de la costa y en zonas de surgencias (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products).

En invierno-primavera se presenta un efecto de afloramiento con mayor concentración de nitratos de las aguas superficiales en el eje de la mezcla vertical (fig. III.5), además se ha reportado máxima productividad a principios de primavera y un segundo pico en agosto y septiembre. Las altas tasas de producción son en respuesta a las altas concentraciones de nutrientes registrados en ese periodo. (Lara-Lara & Bazán, 2005).

Los veranos poseen una tendencia constante en concentración de clorofila_ *a* variando en el intervalo de 0.17 mg/m³ con un promedio de 0.24 mg/m³. Las variaciones en la época invernal son más marcadas con una variación entre 0.12 mg/m³ y 0.60mg/m³ con un promedio de 0.33 mg/m³.

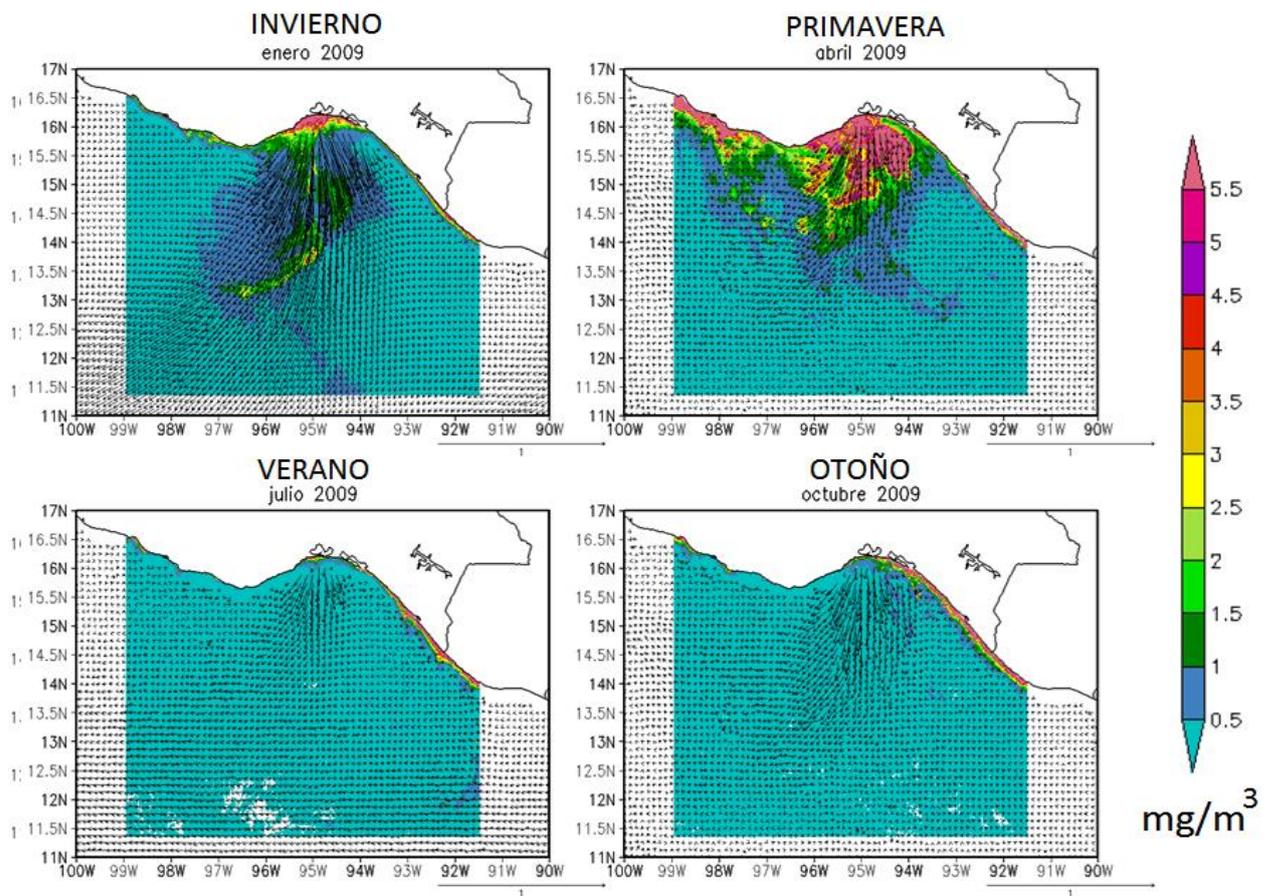


Fig. III.5. Mapas de clorofila_ *a* (de 0.05 a 5.5 mg/m³) en el Golfo de Tehuantepec, para las diferentes épocas del año (primavera, verano, otoño e invierno) durante el 2009. (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products).

Las variaciones interanuales son abruptas, lo mismo que las intermensuales de un mismo año. Este patrón se explica debido a que en el GT se considera el efecto de la surgencia como el factor de mayor peso en esta época invernal. Estas variaciones se ven reducidas al considerar las anomalías de clorofila (fig. III.6). El rango de anomalía es mayor en el invierno que en el verano y la tendencia en la época invernal es hacia anomalías positivas (Aguirre & Salmerón, 2007).

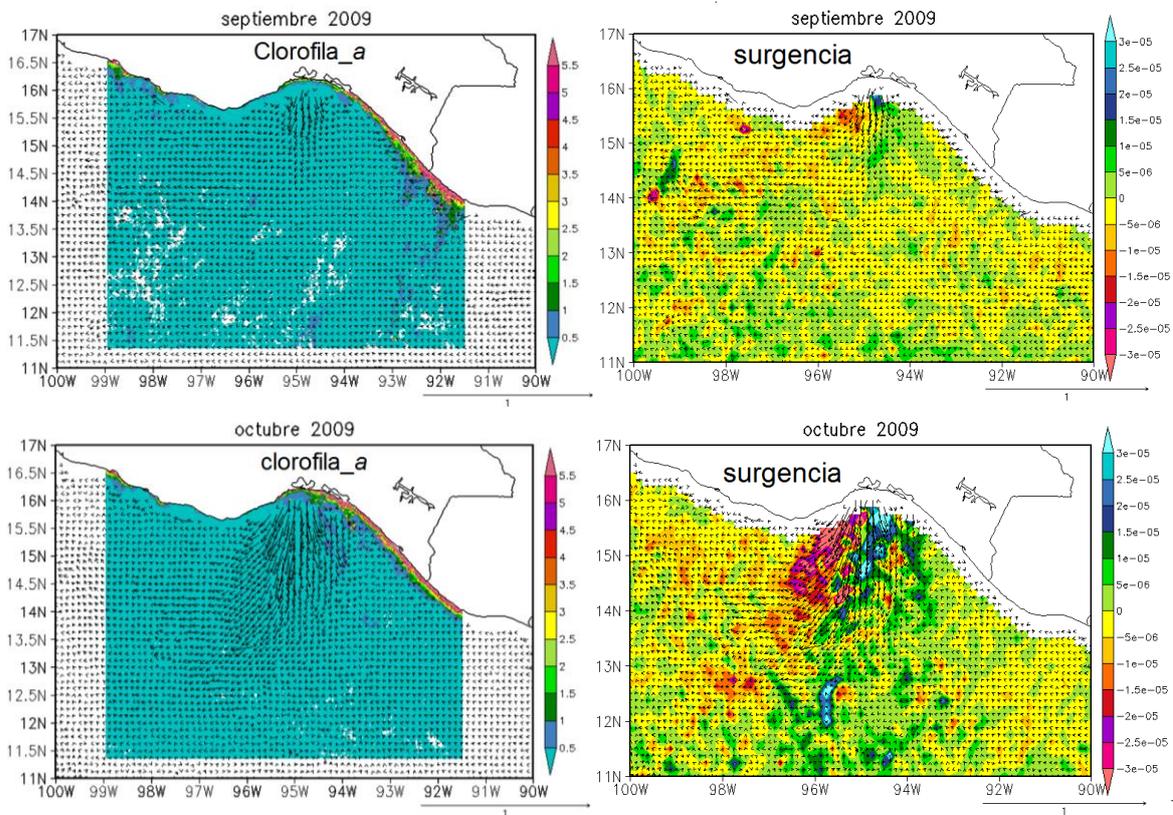


Fig.

III.6. Mapas de la zona de estudio en la que se observan concentraciones de clorofila_a (mg/m^3), surgencia (m/s) y datos de viento para los meses de septiembre y octubre del 2009. (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products y <http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/griddap>).

La distribución de corrientes y los patrones de remolinos combinados con la distribución del color de la superficie del océano, permiten establecer los valores de clorofila_a (alrededor de $1 \text{ mg}/\text{m}^3$), particularmente mar abierto, lo que a su vez da información sobre los bancos de pesca en ciertas zonas donde existe transición de temperaturas producidas por corrientes marinas, esto es útil para apoyar las tareas de pesca, no sólo en el lugar y el tiempo

adecuados, sino también en las tareas de recolección óptima (Lira, 1987), sin embargo, en las zonas costeras los valores observados, mayores a los 5 mg/m³, deben ser tomados con reservas debido a que en algunas ocasiones, además de clorofila_ *a* se puede detectar, por medio del satélite, otro tipo de material en suspensión.

La surgencia es otro factor de co-variabilidad entre la TSM y el viento, ya que bajo condiciones normales se observa una baja temperatura en su presencia por lo que las concentraciones de fitoplancton se incrementan en grandes áreas debido a la intensificación de la oferta de nutrientes superficial causada por el fuerte viento (fig. III.6). La variación estacional de la surgencia de Tehuantepec se aprecia claramente en los compuestos del mes de febrero y julio (Tapia, 1999).

Las condiciones de estrés, generadas por las surgencias, limitan la presencia de especies que no son capaces de soportar el cambio en las condiciones ambientales. Durante épocas en las que no se presenta mezcla en la columna de agua la diversidad de especies aumenta, debido a que no existen condiciones extremas.

*3.5. Variabilidad de la clorofila_ *a* y de la temperatura superficial del mar*

La temperatura superficial del mar sirve como representante de la variabilidad tropical y se correlaciona de manera negativa con la clorofila, debido a que dependen de los factores de crecimiento del fitoplancton, como los nutrientes (nitratos, fosfato, silicato, entre otros) y la radiación de onda corta. Cuando la corriente hace que ascienda el agua del fondo marino, la temperatura de la superficie disminuye y aumenta la concentración del nutriente cerca de la superficie. En general, el fitoplancton es abundante a lo largo de las regiones costeras debido a la entrada de sedimentos de los ríos y la disponibilidad de nutrientes a través de bombeo de Ekman (Park, et al, 2011).

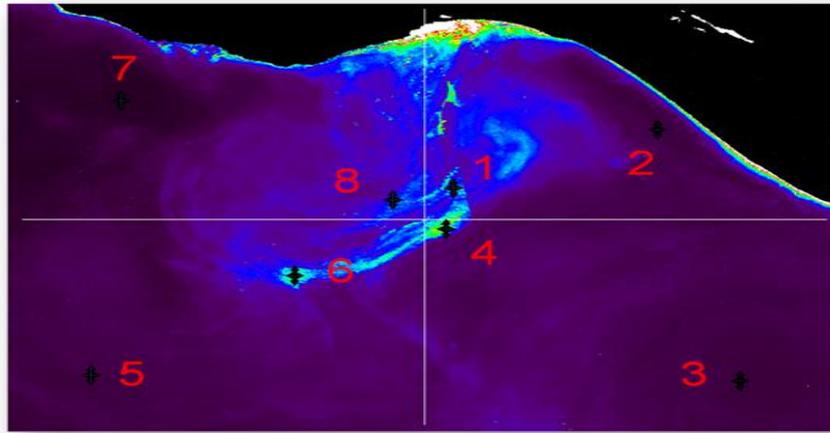


Fig.III.7 Área de estudio con puntos en donde se obtuvieron datos para observar los valores de la temperatura y la clorofila *a*. En color azul se observan concentraciones de clorofila de 0.05 a 5.5 mg/m³, el color morado presenta valores menores al 1.0 mg/m³, y el color blanco representa valores mayores al 5.5 mg/m³ (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products).

En el Pacífico oriental y occidental, la concentración de clorofila disminuye linealmente con la TSM, en eventos como El Niño (anomalía positiva) y La Niña (anomalía negativa), por lo que en el presente estudio se mostró que en mar abierto la abundancia de clorofila aumenta en los puntos 1, 4, 6 y 8, que se encuentran cercanos a la surgencia [0.5 - 4.5 mg/m³] debido a que el suministro de nutrientes es suficiente para que se vea favorecido el fitoplancton en estas zonas de mezcla, mientras que conforme se va alejando de dicha zona (puntos, 2, 3, 5 y 7) existe una reducción en la concentración de clorofila [0 -1 mg/m³] (figs. III.7 y III.8. a y b) principalmente, por la disminución de los nutrientes que se encuentran asociados con el afloramiento ecuatorial (Park, et al, 2011).

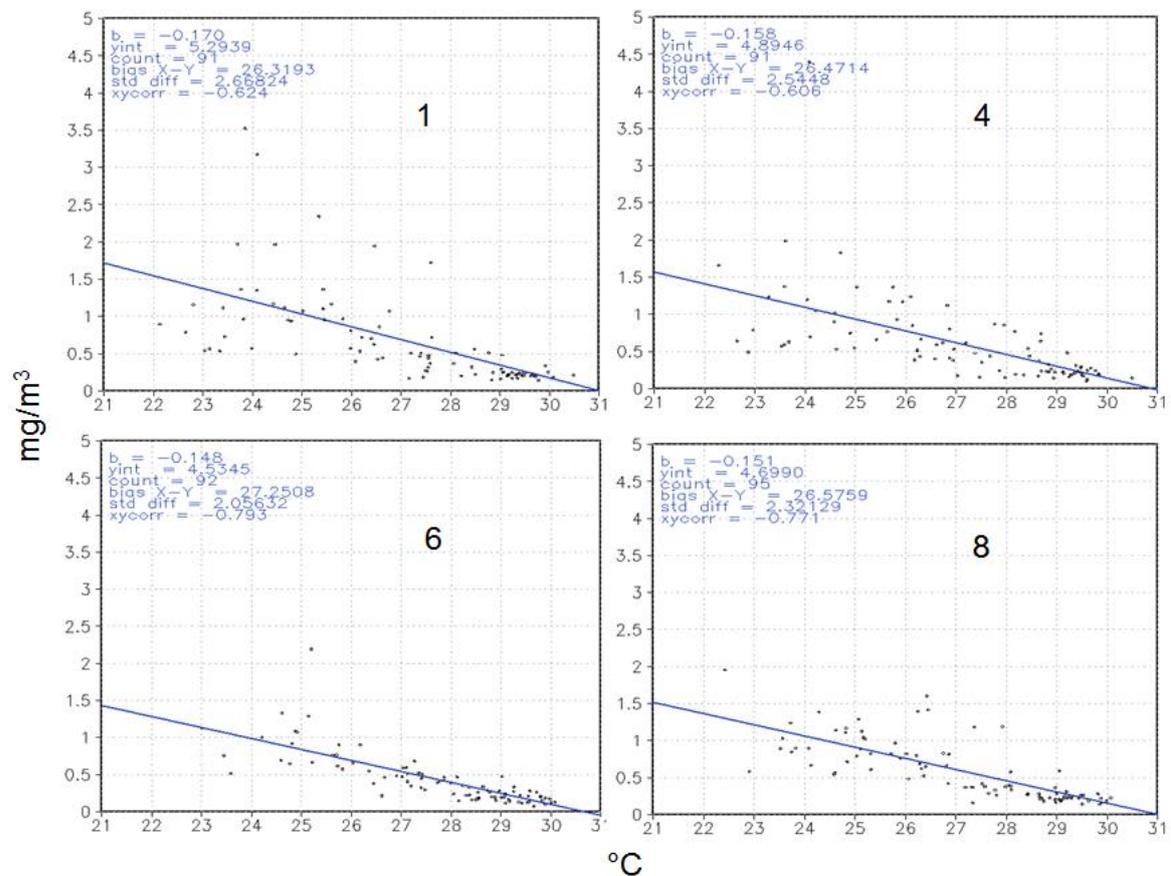


Fig. III.8.a. Correlaciones entre la clorofila_a (mg/m^3) y la temperatura superficial del mar ($^{\circ}\text{C}$) en puntos cercanos a la surgencia, en años Niña, Niño y Normal.

También se ha observado que la relación entre la TSM y la clorofila_a se vuelve más compleja por factores físicos como la termoclina (capa en la columna de agua, en la que se observa un cambio brusco de temperatura) y la estratificación, debido a que la presencia de un giro originada por la espiral de Ekman en una columna de agua fuertemente estratificada, puede generar un desplazamiento de agua hacia la superficie, de la parte inferior o intermedia con agua pobre en nutrientes. Sin embargo, se puede incrementar si la termoclina está más profunda de lo normal, dando como resultado un aumento en la concentración de nutrientes (López-Calderón et al, 2006). Esto se observa

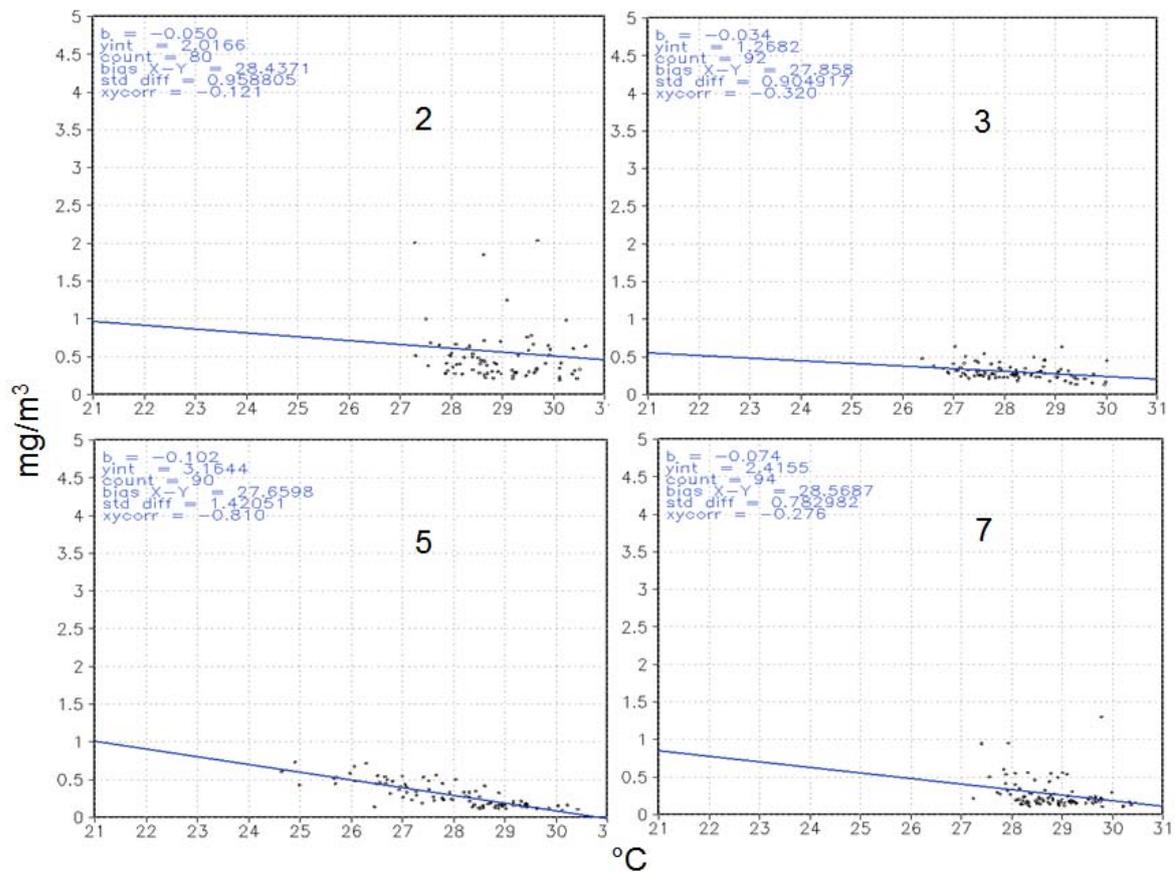


Fig. III.8.b Correlaciones entre la clorofila_a (mg/m^3) y la temperatura superficial del mar ($^{\circ}\text{C}$) en puntos alejados de la surgencia, en años Niña, Niño y Normal.

en los datos analizados del presente trabajo (fig. III.8. a) en donde encontramos de manera general que en los puntos cercanos a la surgencia no se nota diferencia alguna en lo que respecta a la temperatura superficial del mar en eventos El Niño, La Niña y en años Normal, ya que se espera que las temperaturas más bajas de La Niña, se concentren entre los 21° y 23°C . Mientras que, en años El Niño se esperarían temperaturas mayores a los 29°C y concentraciones de clorofila menores a $1\ \text{mg}/\text{m}^3$ (Inapesca, 2013). Sin embargo en los puntos alejados de la zona de surgencia (fig. III.8. b) no se muestran evidencias, debido a que no se diferencian unos de otros, esto puede deberse a la presencia de la "alberca de agua cálida" del Pacífico tropical mexicano. Dicho fenómeno se caracteriza por la presencia de aguas provenientes de la corriente costera de Costa Rica. Su dinámica se debe a los intensos "Nortes" que soplan cada invierno de octubre a marzo, y que resultan en una mezcla de las

aguas en la capa superficial del mar, por lo tanto, durante un evento El Niño, los cambios en la circulación del océano cerca del Ecuador, y las modificaciones de la circulación atmosférica invernal afectan las características medias del Golfo de Tehuantepec (Magaña, 2004).

3.6. *La productividad en el Golfo de Tehuantepec*

En el Golfo de Tehuantepec, la agitación de las aguas debido al esfuerzo del viento, rompen la estratificación de la columna de agua con altas concentraciones de nutrientes a la zona eufótica, y estas son favorables para que las fuentes de agua presenten una reacción en cadena, es decir, aumenta las producciones del fitoplancton y zooplancton, que a su vez, hacen que las formas marinas más grandes, sean de mayor distribución, terminando en una legítima cadena alimenticia o alta productividad biológica.

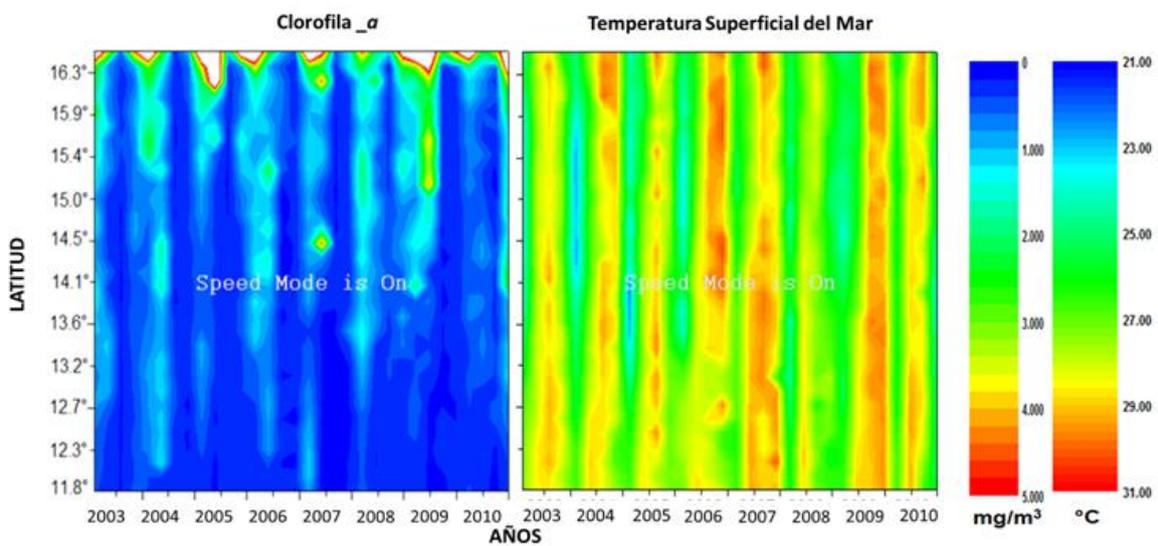


Fig. III.9.a .Transecto latitudinal que muestra la evolución anual de la temperatura superficial del mar y clorofila_a. desde al año 2003 al 2010. (Las zonas cercanas a la costa en color blanco, representan concentraciones mayores a los 5 mg/m³) (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products).

Dentro de un amplio panorama espacio-temporal de la surgencia la intensidad de la productividad se manifiesta con una mayor concentración de clorofila cuando la TSM es

menor frente a la costa (entre los 14° y 16° de latitud) debido al afloramiento costero que trae aguas más frías de las capas sub-superficiales, así mismo, las corrientes y las propiedades del agua revelan un fuerte acoplamiento de los patrones de la productividad impulsada por el viento, con afloramiento de nutrientes y remolinos ciclónicos logrando que incremente la producción primaria (López-Calderón et al, 2006). Dicha relación se puede observar en las figuras III.9. a, b con los transectos obtenidos en latitud y longitud, en los cuales se muestra un patrón, desde 2003 al 2010, en el que, cuando existe TSM baja la concentración de clorofila_a aumenta y viceversa.

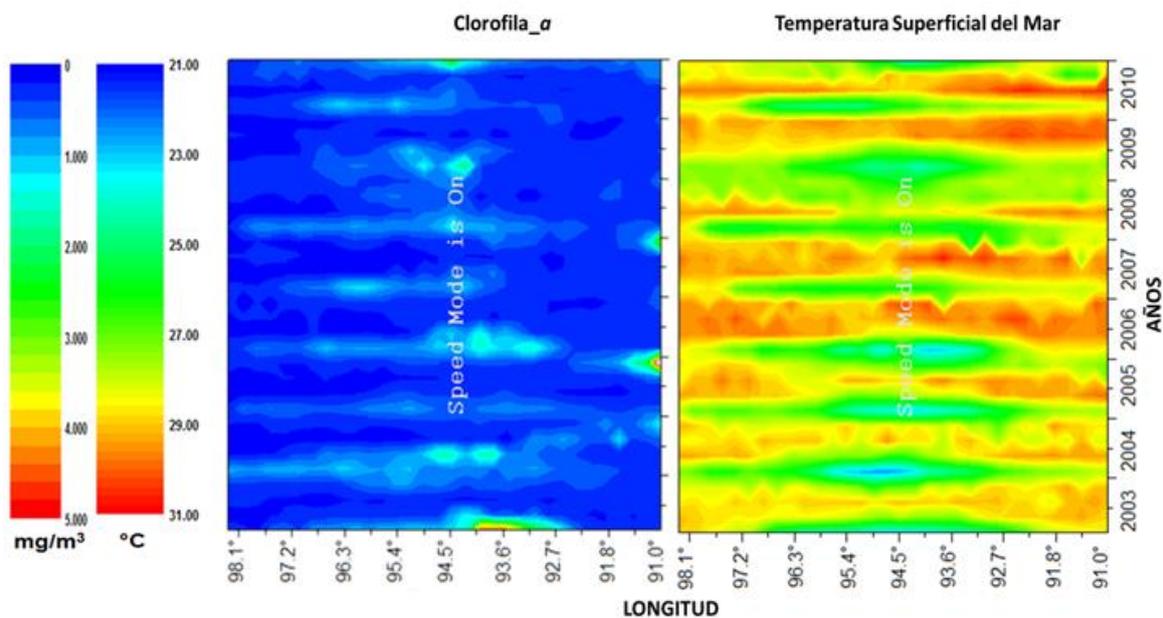


Fig. III.9.b. Transecto longitudinal que muestra la evolución anual, de la temperatura superficial del mar y clorofila_a desde el año 2003 al 2010. (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products).

3.7. Caso de estudio: Tormenta Tropical Agatha

Además de los cambios que se observan en relación a la TSM con respecto a la clorofila_a, de mayo a octubre el Golfo de Tehuantepec es afectado por el paso de huracanes y tormentas tropicales que incrementan la precipitación en la zona y cuando ocurre un evento de esta magnitud, se puede observar un incremento de la biomasa a lo

largo de su trayectoria pero también un incremento en su distribución espacial, lo que conlleva a que se interrumpa e incluso se modifique la distribución y abundancia de la biomasa de plancton asociados con remolinos de mesoescala (Gierach, et al., 2009; Liu, et al, 2009) y por lo tanto de especies de importancia comercial. Un ejemplo de esto es la Tormenta Tropical Agatha (TTA), la cual con su paso, a pesar de no ser catalogado de gran impacto, se mantuvo en alerta preventiva por las lluvias torrenciales que se presentaron en zonas que cubrían desde el Istmo de Tehuantepec hasta la Península de Yucatán.

La Tormenta Tropical Agatha (fig. III.10) fue el primero de los ciclones de la temporada en el 2010 y el primero que afectó directamente al país, tocó tierra en las cercanías de la frontera entre México y Guatemala. Se organizó en las primeras horas del 29 de mayo convirtiéndose en depresión tropical y se disipó al día siguiente, con vientos que alcanzaron los 75 km/h y una presión mínima de 1000 hPa. Al tocar tierra con intensidad de tormenta, causó deslizamientos de suelo e innumerables ríos desbordados, produjo lluvias intensas durante varios días a lo largo de la costa del Océano Pacífico, desde Nicaragua hasta el Golfo de Tehuantepec y cobró la vida de varias decenas de personas, desplazando a cientos de miles y provocando la destrucción de miles de hogares e infraestructura (Depto. de Investigación y Servicios Climáticos. Guatemala 2010). (SEMARNAT en colaboración con la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional).

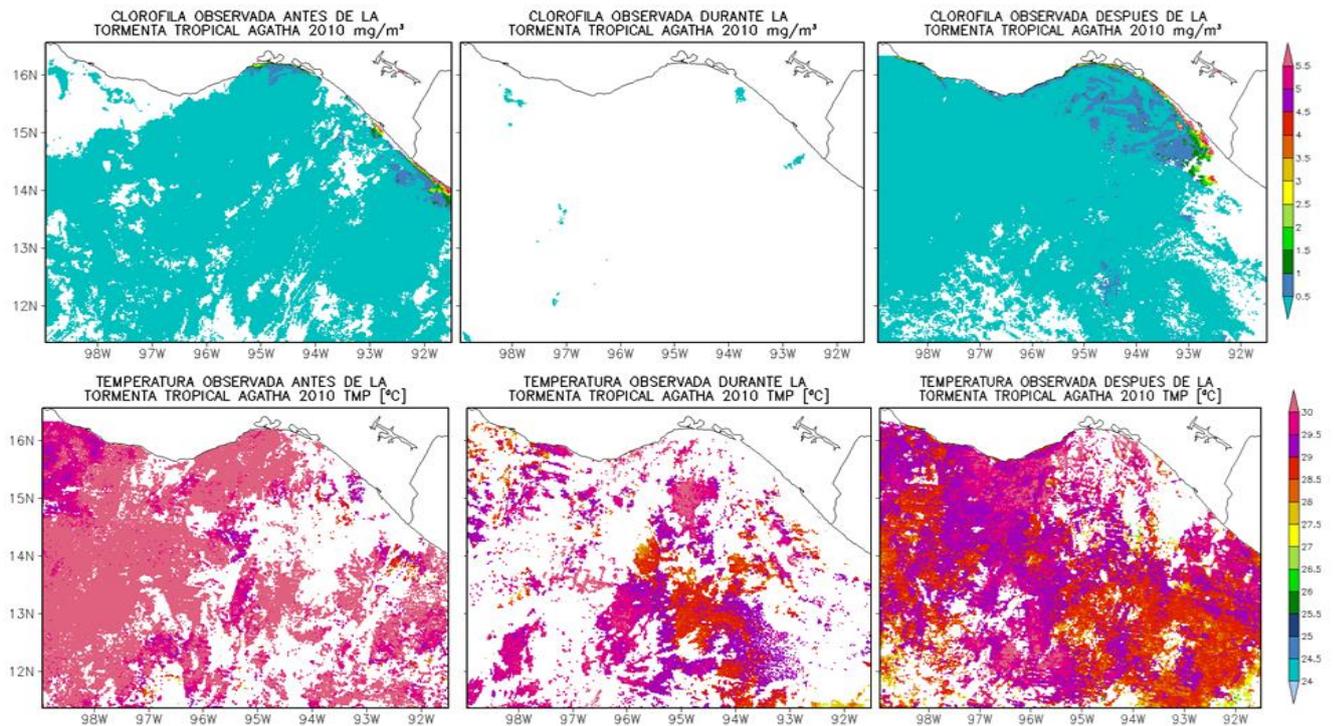


Fig. III.10.-Clorofila y temperatura observada una semana antes, durante y una semana

después del paso de la Tormenta Tropical Agatha, del 29 al 30 de mayo de 2010. Las áreas blancas que se observan en los mapas son por falta de datos. (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products).

El SMN, al convertirse en ciclón tropical emitió advertencias de tormenta tropical para la costa del EL Salvador y Guatemala, con altas probabilidades de que causara inundaciones y deslizamientos de tierra. Además, se vio que la TTA tenía potencial de precipitaciones de entre 250 y 500 mm. En México, el SMN pronosticó que Agatha produciría hasta 100 mm de lluvia en los estados del Sur, principalmente en Chiapas cerca de la frontera con Guatemala, país donde la tormenta tocó tierra, con un impacto de al menos a 120 familias, las cuales fueron evacuadas. También fue declarada una alerta amarilla, al preverse inundaciones de importancia en todo el estado. (Stewart, 2010; Stewart & Kimberlain, 2010).

Agatha fue un débil, aunque destructor, ciclón tropical en el Océano Pacífico Oriental, además de ser la primera tormenta de la temporada de huracanes en el Pacífico Oriental de 2010 y la más mortal desde el huracán Paulina de 1997, originándose en la zona de

convergencia intertropical (ZCIT), región ecuatorial donde convergen la humedad tropical y se desarrollan numerosas tormentas eléctricas (Brown & Roberts, 2010).

La Secretaría Ejecutiva del Sistema Nacional para la Prevención, Mitigación y Atención de Desastres de Nicaragua (SE-SINAPRED), informó que el sábado, 29 de mayo de 2010 a las 12:00 hrs el centro de baja presión se localizó al Sur del Golfo de Tehuantepec, México, y en las últimas 12 horas evolucionó en tormenta, encontrándose a 445 Km al oeste de San Salvador y a 790 Km de Managua, sin representar peligro para nuestro país. Continuó un eje de vaguada sobre la costa Caribe nicaragüense y con la interacción de ambos sistemas (tormenta tropical y eje de vaguada), permitió que se mantuviera el aporte de humedad sobre la región del Pacífico (fig. III.11).

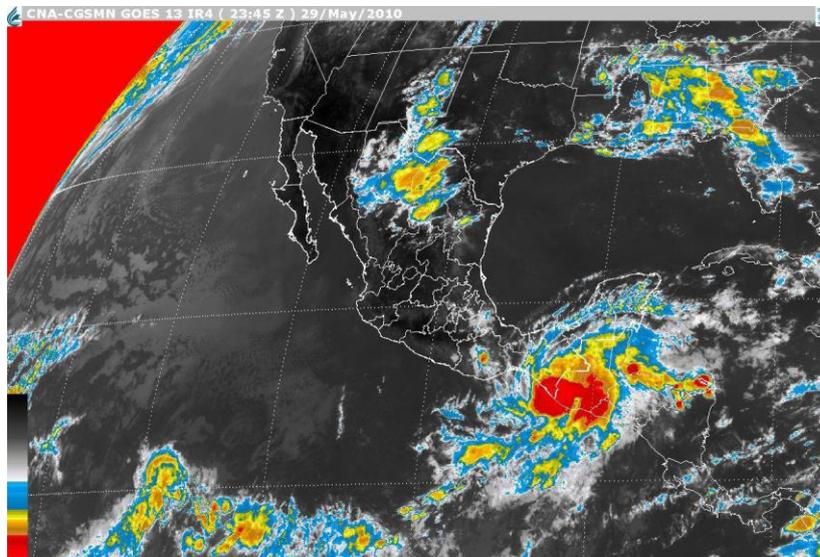


Fig. III.11.- Imagen satelital del 29 de mayo de 2010 en la que se muestra la presencia de la Tormenta Tropical Agatha en tierra sobre Chiapas - Guatemala. (Tomada de CNA-CGSMN _ GOES-13 IR4 Mayo 29.2010/23:45 GMT).

En México, las lluvias se mantuvieron, de ligeras a moderadas y con tormentas eléctricas, con mayor incidencia en la zona occidental de la región del Pacífico. (Nota Informativa No. 7 del INETER).

Dicho lo anterior, los fenómenos climáticos, como los episodios cálido y frío del ENSO, promueven diferentes niveles de productividad. Los episodios cálidos y la esorrentía de agua dulce originan a menudo proliferaciones de algas que en ocasiones provocan anoxia o efectos tóxicos y una mortandad posterior de peces como resultado de una rápida transmisión de energía a las formas tróficas inferiores (Alexander, et al, 2011).

3.8. Pesca de Huachinango

Los peces manifiestan muchas interrelaciones con sistemas costeros y laguneros, que incluyen migraciones por apareamiento, desove, alimentación, protección, alevinaje (fase de crianza que comprende entre la larva y el adulto) y depredación, debido a que estos ecosistemas y sus áreas protegidas y críticas ofrecen un medio ambiente propicio para estas actividades, por lo que se desprende la extrema importancia que tiene la presencia de dichos fenómenos climáticos a mesoescala con las pesquerías litorales (Contreras, 2002).

Entre la gran diversidad de especies de la captura comercial, los pargos y huachinangos son objeto del mayor esfuerzo e interés de los pescadores en el GT, como el huachinango (*Lutjanus sp.*), la cual es una especie de escama que representa una alternativa de alto potencial para promover la diversificación de la camaronicultura (Abdo et al, 2011), además de que se cotiza a buen precio y que está presente en las capturas todo el año con sus respectivas variaciones (Ramos, 2001; Espino-Barr & Cruz Romero, 2006).

El huachinango obtiene una mayor importancia económica en el ámbito regional y estatal, debido a que las principales capturas de estas especies provienen de la región de la “Costa Chica”, colindante con el estado de Guerrero, la cual en 1994 aportó el 50% de la captura estatal del huachinango y el 44% de pargo, en tanto que el puerto de Salina Cruz se registró el 33 y 24% respectivamente.

Se ha observado que a partir del mes de octubre esta especie inicia un patrón de reclutamiento hacia las áreas de crecimiento y pesca que se hace más evidente en noviembre dado las bajas temperaturas de la zona (Ruíz, 1993).

Las poblaciones de peces salen de la zona de captura durante el fenómeno de La Niña y por el contrario, durante El Niño se acercan a la costa organismos de tallas grandes, haciéndose más vulnerables a la pesca. Los juveniles son capturados con redes de arrastre camaronero, como captura incidental.

El desove del huachinango, se representa en dos temporadas: la de lluvias que coincide con la presencia de altas temperaturas (ocurre entre julio y noviembre) y una temporada más corta que abarca los cuatro primeros meses del año. Se presentan diferentes fases de madurez a lo largo de todo el año (Santamaría, et al, 2001; Espino et al, 2004; Carta Nacional de Pesca, 2010).

Existen especies con gran valor económico en el mercado y que se pueden pescar por temporadas o a lo largo de todo el año que provocan una sobreexplotación por la exagerada demanda de alimento (Guzmán & Fuentes, 2006; Espino, et al, 2006).

Según el diario oficial de INAPESCA de 2010, el huachinango *Lutjanus peru* y el pargo lunarejo *Lutjanus guttatus*, son las especies más importantes en Jalisco y Michoacán, entre la costa Chica de Guerrero y Punta Chipehua, Oaxaca, además de que se obtiene la mayor proporción de huachinango, prieto y colmillón.

Lutjanus peru (Nichols & Murphy, 1922), denominado huachinango del Pacífico o pargo liso, tienen una talla de 50 cm, sin embargo se han encontrado en tallas máximas de 95 cm. Se encuentran entre los 0 y 80 m de profundidad. Se producen principalmente en fondos rocosos y arenosos y altamar. Se distribuye desde el Sur de California, Golfo de California central a Perú, las Revillagigedo y Malpelo. Es importante para pesquería de subsistencia (fig. III.12).



Fig. III.12.- Distribución del Pargo liso o *Lutjanus peru* (Nichols & Murphy, 1922). Los puntos rojos son las zonas en las que se han reportado esta especie (<http://www.conapesca.sagarpa.gob.mx/wb>).

Lutjanus guttatus (Steindachner, 1869), denominado huachinango o pargo lunarejo o flamenco, tienen una talla de 40 cm sin embargo se han encontrado en tallas máximas de 80 cm. Se encuentran entre los 0 y 107 m de profundidad. Se producen principalmente cerca de la costa en bahías de arena, en lugares profundos de arrastre. Se distribuye desde el Sur de California, Golfo de California, Perú, Coco y Malpelo. Es importante para pesquería comercial y deportiva (fig. III.13).

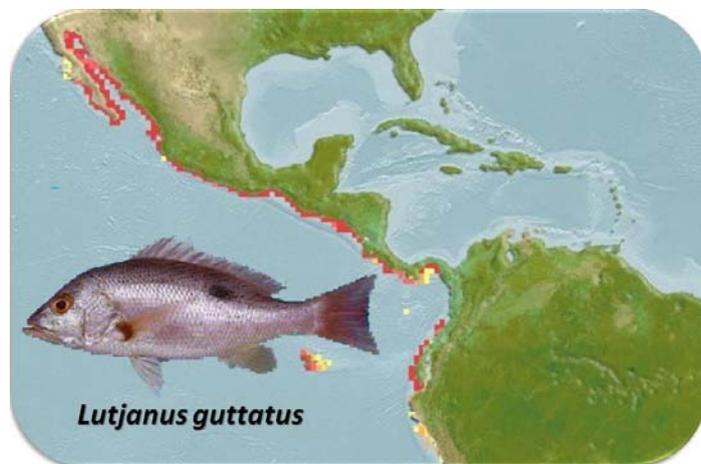


Fig.III.13.- Distribución del Pargo lunarejo o *Lutjanus guttatus* (Steindachner, 1869).). Los puntos rojos son las zonas en las que se han reportado esta especie (<http://www.conapesca.sagarpa.gob.mx/wb>).

Las dos especies son depredadores generalistas, capaces de ingerir un amplio espectro de especies, fundamentalmente peces y crustáceos (cangrejos, camarones y en menor proporción estomatópodos, langostas y cefalópodos), debido a que comúnmente se encuentran en hábitats bentónicos a lo largo de los trópicos y subtrópicos. No tienen competencia intraespecífica por el alimento y se les cataloga como consumidores de tercer orden, que incluye peces exclusivamente carnívoros, donde los vegetales y detritus son alimento accidental (Carta Nacional de Pesca, 2010).

La pesquería de los huachinangos y pargos se realiza en toda el área de su distribución geográfica, la dominancia de una o varias especies en la captura difiere en función de la latitud y profundidad en el Pacífico Sur, sin embargo existen reportes de que se obtiene la mayor proporción en la captura de huachinango y colmillón desde la Costa Chica de Guerrero hasta Punta Chipehua, Oaxaca (Carta Nacional de Pesca, 2010).

Los efectos combinados de los cambios en la circulación, temperatura, nutrientes y productividad primaria, se acumulan progresivamente en la cadena trófica e influyen en la disponibilidad de alimento y en las condiciones de hábitat del pargo liso (*Lutjanus peru*) y del pargo lunarejo (*L. guttatus*) (Ruíz, 1993).

3.9. Pronóstico estadístico de productividad

Durante mucho tiempo se ha determinado la aparición y desaparición de recursos pesqueros locales relacionadas con la protección, restauración y utilización de los hábitat, por lo que muchas personas que se ocupan del estudio de las pesquerías consideran muy útiles los pronósticos, donde los principales problemas se deben a la variabilidad de las condiciones naturales, así como también la información indirecta que permita hacerse de una idea, en un plazo de tiempo en lo que se refiere a los cambios en la corriente como consecuencia de una depresión cálida, o en periodos más fríos de contraste con la corriente, inducidos por el viento.

Por tal motivo se realizaron pronósticos para una parte de la zona de estudio en el GT en dos cuadrantes, comprendiendo las coordenadas de entre los 15° -16.5° latitud N, y los 93.5° -97° longitud W (figs. III.14.a, b).

Al analizar las salidas generadas por el modelo del CPT, se encuentra una sobreestimación en lo pronosticado, probablemente como resultado de una proyección basada, principalmente, en los datos disponibles sobre la actividad solar procedentes de imágenes de satélite, sin considerar los procesos internos (como corrientes, bombeo de Ekman, entrada de aguas más frías por la cercanía de lagunas y ríos, masas de agua diferentes y la cubierta vegetal cercana a la costa) la absorción de la energía infrarroja se ve afectada, además, es importante mencionar el ciclo anual de las condiciones meteorológicas estacionales como consecuencia de continuos cambios físicos que favorecen o complican a este tipo de mezcla de aguas.

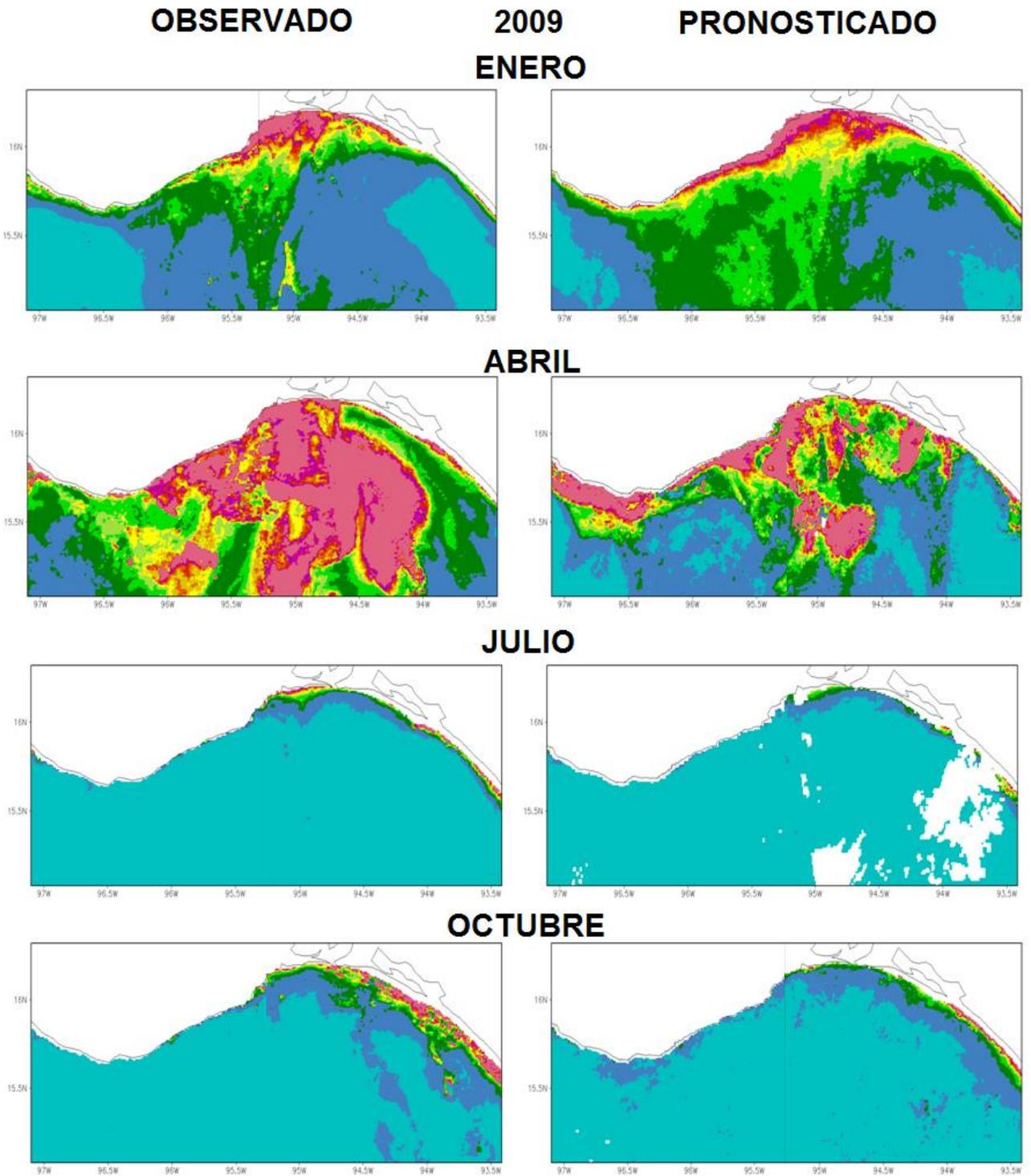


Fig. III.14.a.-Clorofila observada Vs pronosticada de los meses de enero, abril, julio y octubre del 2009, mediante el software CPT del IRI integrando la TSM (°C) como predictante. En las zonas blancas no existen datos (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products).

Dado lo anterior, se debe tomar en cuenta que existe un desfase en lo pronosticado con lo observado de uno a dos meses, esto es, debido a que el océano se tarda en calentar y en enfriar, en comparación con la tierra, dando como resultado que la producción de alimentos

pesqueros no se vean reflejados de inmediato. Sin embargo, también dependen de la distancia en la que se encuentre un punto en específico a estudiar, ya sea cerca de la costa, de la zona de surgencia o en mar abierto, además también depende de la intensidad con la que ocurre el afloramiento de aguas profundas, carentes de oxígeno, hacia la superficie.

Así mismo, se puede decir que los experimentos presentados mediante el modelo del CPT, revelan la sensibilidad de la productividad en relación a estas zonas, al comprobar un descenso de temperatura de la capa superficial, relacionadas con la fuerza que ejerce el viento sobre la superficie del mar.

En términos generales, se ha comprobado que los patrones relativos al campo de viento dominante, la temperatura superficial del mar y la presión al nivel del mar en las grandes regiones climáticas son indicadores de cambios climáticos, a su vez de ser precursores de las respuestas de los ecosistemas pesqueros a gran escala, aunque en algunos casos esos patrones simplemente están correlacionados y no permiten hacer pronósticos, por lo que resulta difícil dar una valoración económica de las zonas de surgencias para facilitar la toma de decisiones en un área de importancia comercial.

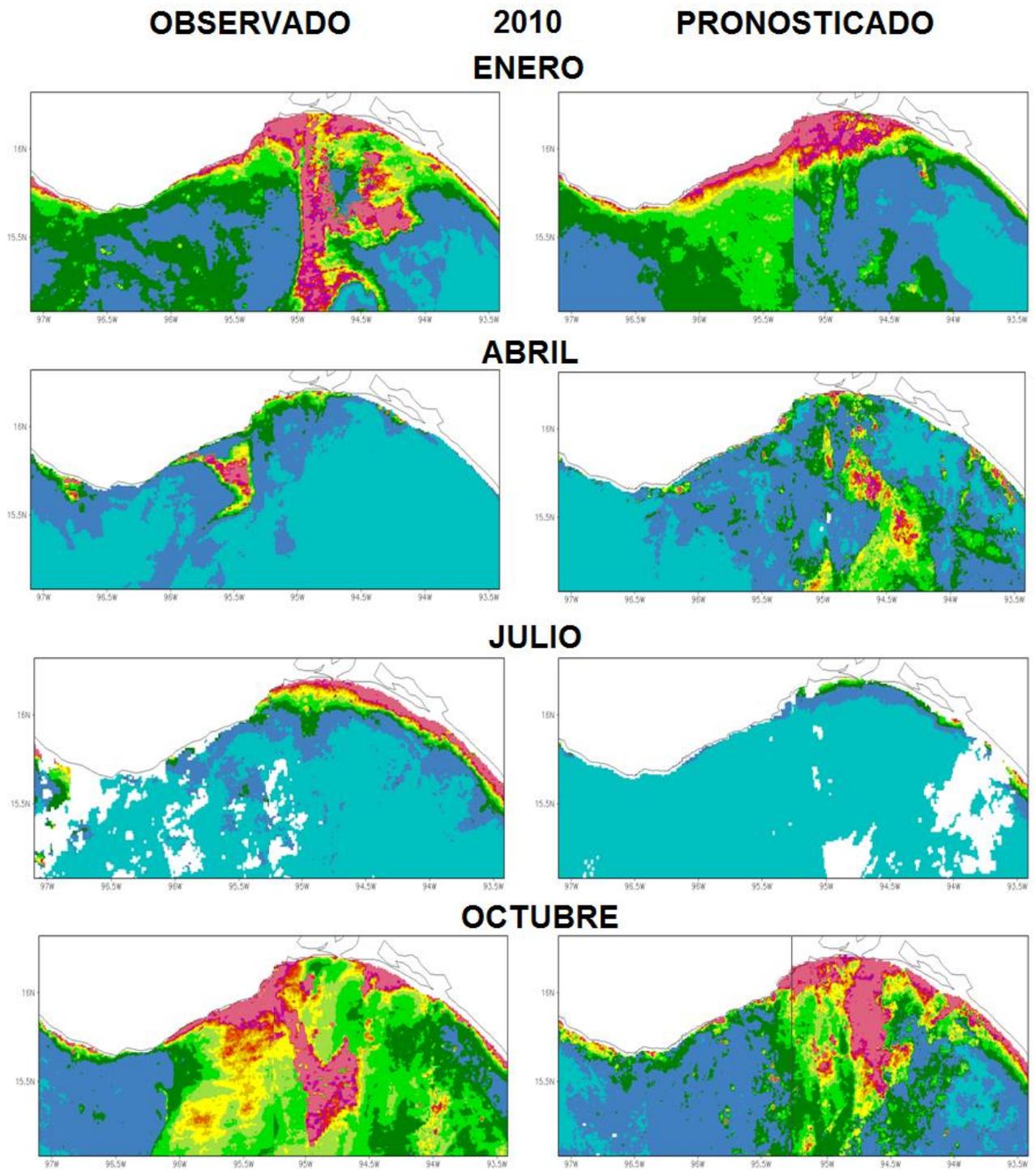


Fig. III.14.b Clorofila observada Vs pronosticada de los meses de enero, abril, julio y octubre del 2010, mediante el software CPT del IRI integrando la TSM (°C) como predictante. En las zonas blancas no existen datos (Fuente de datos: ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products).

4.1. Conclusiones

Al conocer los factores relacionados con el clima y las condiciones meteorológicas que determinan los estados alternativos en las regiones de las corrientes, muchos estudios en la pesca se encuentran asociadas actualmente a la velocidad y la dirección del viento, entre otros parámetros, y se comparan con los resultados de las temperaturas en las capas superiores del océano, la producción primaria y diversos datos relacionados a la diversidad de las especies tanto su distribución como su abundancia (Sharp, 2004).

La producción primaria es estacional, debido a que se encuentra relacionada con los vientos, niveles de luz y nutrientes necesarios para determinar la conexión de la variabilidad biológica, así como con factores que varían en función de las condiciones meteorológicas (El Niño, La Niña, tormentas tropicales, huracanes, etc.) y el clima de cada una de las regiones de interés que se correlacionan con cambios de temperatura.

Los patrones de las condiciones meteorológicas diarias son más dinámicos dentro de sus contextos estacionales y locales, pero las condiciones meteorológicas de los océanos tienen sus propias escalas temporales y espaciales que comprenden desde respuestas casi instantáneas a los cambios en los vientos de superficie y en los niveles de luz hasta respuestas retardadas a las transferencias de los procesos de forzamiento, en dirección al fondo, hacia el exterior en forma de olas, en la superficie y en otras partes.

La mezcla vertical aumenta la productividad biológica por la ayuda de la circulación oceánica que transporta agua rica en nutrientes a la zona eufótica donde la fotosíntesis y procesos derivados producen gran cantidad de fitoplancton y por lo tanto de materia orgánica lo que resulta en un aumento de recursos marinos.

En mar abierto del Golfo de Tehuantepec, por medio de las imágenes de satélites, se identifican los siguientes periodos: uno de surgencia intensa (otoño e invierno) que presenta valores de concentración de clorofila relativamente altas; otro de relajamiento de la surgencia (primavera) en el cual se encontraron altas concentraciones de clorofila [5 mg/m³]; y un tercer periodo durante el verano, con valores mínimos de clorofila [0-1 mg/m³].

En general, la productividad cerca de la costa se presenta en mayor concentración (mayor a 5mg/m³) si se compara con el océano, lo que permite confirmar que esta zona es de alta fertilidad durante otoño e invierno similar a otras regiones en el Océano Pacífico frente a México (López-Sandoval, et al., 2009).

En escalas temporales cortas (unos pocos años), los factores de estrés fisiológico inducidos por la temperatura tienen repercusiones en los índices de abundancia de muchas poblaciones marinas, en este caso, como el pargo liso (*Lutjanus peru*) y el pargo lunarejo (*L. guttatus*), alterando la composición de las comunidades de estas especies por ser un componente ecológico sobresaliente de los sistemas costeros debido a los recursos alimenticios que representan.

4.2. *Perspectivas a Futuro*

Considerando que la necesidad de la humanidad en alimentos y la producción de los mismos han sufrido la variabilidad del clima y dichas modificaciones son motivo de grandes preocupaciones, especialmente en las regiones de extrema pobreza, se debe tener en cuenta un estudio más detallado con relación a factores biológicos en cuestión de productividad, además de tener en cuenta los procesos físicos internos que se presentan en el océano y de contar con datos de tiempo no menor a 10 años de estudio para obtener un mejor resultado. También se debe contar con datos *in situ*, esto es, de campañas oceanográficas que midan parámetros físico-químicos además de muestreos biológicos y geológicos, con los cuales nos proporcionen datos más significativos que den respuestas casi instantáneas en lo social, económico y ambiental.

Dicho lo anterior, los interesados en las pesquerías, englobando ordenamiento ecológico y comercial, encontrarían de gran utilidad este tipo de investigaciones en pronósticos de productividad, es decir, un plan a corto y largo plazo, según sea el caso, que les permita de forma indirecta desarrollar una estrategia en sustentabilidad y protección para especies en peligro de extinción.

A partir de modelos de predicción, se recomienda realizar los pronósticos con una base de datos que contenga un mayor número de datos, con el fin de que el modelo sea más robusto y el resultado más cercano a lo observado por años.

El CPT se puede utilizar en entornos más generales para llevar a cabo análisis o regresión de componentes principales en los datos y las relaciones históricas entre patrones de

diferentes escalas que se mantienen aún bajo cambio climático, además de factores topográficos que determinan el clima de una región o localidad. En el presente estudio solo se tomaron en cuenta variables oceanográficas (la temperatura superficial del mar) y meteorológicas (vientos) como predictandos, aunque se pudieran agregar más variables para mejorar el modelo, sin embargo se debe considerar que este tipo de modelos, en términos de capacidad humana, tiempo de cómputo y de presentación de información, es muy demandante, por lo tanto solo es posible unos cuantos experimentos de alta resolución que representen, de forma general, las características principales de un lugar en específico.

Los pronósticos obtenidos bajo estas consideraciones podrían alcanzar un resultado satisfactorio en su aplicación bajo un planteamiento de estrategia eficaz y significativa para el desarrollo de la pesca en México.

Referencias

Abdo de la Parra Ma. I. , L. E. Rodríguez-Ibarra, G. Velasco-Blanco, N. García-Aguilar & B. González-Rodríguez. 2011. Evaluación del efecto de la salinidad sobre la incubación de huevos y eclosión de larvas del pargo flamenco (*Lutjanus guttatus*). *Ciencia Pesquera*. Vol. 19 (1):29-34 pp.

Aguirre-Gómez R. & O. Salmerón-García. 2007. Cap18: Análisis estacional de la variación en la clorofila en el Pacífico Sur Mexicano mediante imágenes SeaWiFS de 1998 a 2004. *En* : Carbono en ecosistemas acuáticos de México. (Eds) Hernández de la Torre B. & G. Gaxiola Castro. *Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales/Instituto nacional de Ecología /Centro de investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada*. 508 p.

Alburquerque S. E. S. Rojas A. J. & Eche LI. J. C. 2008. Estimación de la temperatura Superficial del Mar Peruano usando imágenes AVHRR y MODIS en el infrarrojo térmico. *Universidad Nacional Mayor de San Marcos-UNSM. Pabellón de física, Venezuela*.

Alexander M. A., H. Seo., S. P. Xie., & J. D. Scott. 2011. ENSO's Impact on the gap wind regions of the Eastern Tropical Pacific Ocean. *Journal of Climate*. Vol. 35 doi:10.1175/JCLI-D-11-00320.1.

Alfaro E. J. & O. G. Lizano. 2001. Algunas relaciones entre las zonas de surgencia del Pacífico Centroamericano y los Océanos Pacífico y Atlántico Tropical. *Revista de Biología Tropical*. 49. Supl. 2: 185-193 pp.

Alvarez, L. G. Badan-Dangon, A. & Valle, A. 1989. On Coastal Currents of Tehuantepec. *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 29:89-96 pp.

Arévalo –Martínez D. L. & A. Franco –Herrera. 2008. Características de la surgencia frente a la ensenada de la Gaira, departamento de Magdalena, época seca menor de 2006. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*. Vol 37 (2): 131-162 pp.

Barton E. D., Ma. L. Argote, J. Brown, P. M. Kosro, M. Lavín, J. M. Robles, R. L. Smith, A. Trasviña & H. S. Velez. 1993. Supersquirt: Dynamics of the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Oceanography*. Vol.6 1:23-30 pp.

Bastidas, M. & E. Rodríguez-Rubio. 2006. Validación de la concentración de clorofila a generada por el sensor MODIS-AQUA con datos in situ en el Pacífico Colombiano. *Revista Colombiana de Física*. 38(2):774-777 pp.

Belkin, I. M., & Cornillon, P. C. 2003. SST fronts of the Pacific coastal and marginal seas. *Pacific Oceanography* 1(2):90-113 p .

Behrenfeld, M.J., R. T. O'Malley; D. A. Siegel; C. R. McClain, J. L. Sarmiento; G. C. Feldman; A. J. Milligan; P. G. Falkowski; R. M. Letelier & E. S. Boss. 2006. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature*. 444, 752-755 pp.

Behrenfeld M. J., T. K. Westberry; E. S. Boss; R. T. O'Malley; D. A. Siegel; J. D. Wiggert, B. A. Franz; C. R. McClain; G. C. Feldman; S. C. Doney; J. K. Moore; G. Dall'Olmo; A. J. Milligan; I. Lima, & N. Mahowald. 2009. Satellite-detected fluorescence reveals global physiology of ocean phytoplankton. *Biogeosciences*. 6, 779-794 pp.

Brown D. & D. Roberts. 2010. Centro Nacional de Huracanes (ed). Weather Outlook.

Bulgakov S. N. & A. Martínez-Zatarain. 2006. Surgencia y vientos favorables en la costa oriental del Pacífico Mexicano. pp.: 29-40. En: M.C. Jiménez-Quiroz y E. Espino-Barr (eds.). *Los recursos pesqueros y acuícolas de Jalisco, Colima y Michoacán*. INP, SAGARPA, México. 622 p.

Carranza E. A, Morales E. & Rosales L. 1998. Tectónica, sedimentología y geoquímica, Cap. 1:1-12 en M. Tapia-García (Ed) El Golfo de Tehuantepec el ecosistema y sus recursos, UAM-Iztapalapa; México. 240 p.

Carta Nacional de Pesca. 2010. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, Pesca y Alimentación. Segunda Sección. Diario Oficial de la Federación.

Cisneros-Mata M. A. 2011. RNIPA : Plataforma para el desarrollo acuícola y pesquero de México. *Ciencia Pesquera*. 19 (2): 77-84 pp.

Chelton, D., M. Freilich & S. Esbensen. 2000. "Satellite observations of the wind jets off the Pacific coast of Central America. Part I: Case studies and statistical characteristics". *Monthly Weather Review*. 128 p.

Chiappa-Carrara X, A. Rojas-Herrera & Maite Mascaró. 2004. Coexistencia de *Lutjanus peru* y *Lutjanus guttatus* (Pisces: Lutjanidae) en la costa de Guerrero, México: relación con la variación temporal en el reclutamiento. *Revista de Biología Tropical*. 52(1): 177-185 pp.

Chuanmin Hu; Zhongping Lee & Bryan Franz. 2012. Chlorophyll a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference. *Journal of Geophysical Research*, vol. 117, c01011, doi:10.1029/2011jc007395.

Contreras, F. E. 2002. Importancia de la pesca ribereña en México. *Contactos*. 46, 5-14 pp.

De la Lanza G. 1991. Oceanografía de mares Mexicanos. AGT Editores, S. A. México 31-49 pp.

Espino E., E. Gpe. Cabral S. A. García B. & M. Puente G. 2004. Especies Marinas con valor comercial de la Costa de Jalisco, México. SAGARPA / Instituto Nacional de la Pesca. Centro Regional de investigación Pesquera de Manzanillo. 145 pp.

Espino-Barr E. & M. Cruz-Romero. 2006. Aspectos generales de la pesca ribereña en el Pacífico mexicano. En: Pesca, Acuicultura e Investigación en México. (Eds) Guzmán Ayala P. & D. F. Fuentes Castellanos. Comisión de Pesca/ CEDRSSA (Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía sustentable. 400 p.

Espinosa-Carreón T. L. & J. E. Valdez-Holguin. 2007. Variabilidad interanual de clorofila en el Golfo de California. *Ecología Aplicada*. Vol 6(1, 2): 83-92 pp.

Franz, B., Werdell, J., Meister, G., Bailey, S., Eplee, R., Feldman, G., Kwiatkowska, E., McClain, C., Patt, F. & D. Thomas. 2005. The Continuity of Ocean Color Measurements from SeaWiFS to MODIS. *Earth Observing Systems X*, SPIE, Volume 5882.

Filonov, A. E. & A. Trasviña. 2000. Internal Waves on the Continental Shelf of the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. (50): 531-548 pp.

Finkl, C. W. & C. Makowski. Eds. 2014. Remote sensing and modeling : Advances in coastal and marine resources. Springer. 501 p.

Flores-Vidal X., R. Durazo, C. Chavanne & P. Flament. 2011. Coastal circulation in the absence of wind in the Gulf of Tehuantepec, Mexico: High-frequency radar observations. *Ciencias Marinas*. 37(4A): 493–512 pp.

Flores-Morales L., A. Parés-Sierra & S. G. Marinone. 2009. Factors that modulate the seasonal variability of the sea surface temperature of the Eastern Tropical Pacific. *Geofísica Internacional*. 48 (3), 337-349 pp.

Gallegos A. & J. Barberán. 1998. Surgencia eólica. Cap 3:27-34 en M. Tapia-García (Ed) El Golfo de Tehuantepec el ecosistema y sus recursos, UAM-Iztapalapa; México. 240 p.

Gallegos García A, J. Zavala Hidalgo, O. Zavala Romero, R. Lecuanda, A. Mateos Jasso & R. Rodríguez Sobreira. 2009. Imágenes dinámicas de la temperatura de la superficie de los mares de México, 1996-2003. En: Ordenamiento Ecológico Marino: visión integrada de la regionalización. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales / INECC. 43-72 pp.

Gierach, M. M., B. Subrahmanyam., A. Samuelsen, & K. Ueyoshi. 2009. Hurricane-driven alteration in plankton community size structure in the Gulf of Mexico: A modeling study. *Geophysical Research Letters*. 36, L07604, doi:10.1029/2009GL037414.

Guzmán A. P. & D. F. Fuentes C. 2006. “Pesca, Acuicultura e Investigación en México”. Comisión de Pesca. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria (CEDRSSA). 400 p.

Hanshaw, M. N., M. S. Lozier, & J. B. Palter. 2008. Integrated impact of tropical cyclones on sea surface chlorophyll in the North Atlantic. *Geophysical Research Letters*. 35, L01601, doi:10.1029/2007GL031862.

Kahru, M., S. T. Gille, R. Murtugudde, P. G. Strutton, M. Manzano, Sarabia, H. Wang, & B. G. Mitchell. 2010. Global correlations between winds and ocean chlorophyll. *Journal of Geophysical Research*. 115, C12040.

Lara-Lara, J. R. & C. Bazán-Guzmán. 2005. Distribución de clorofila y producción primaria por clases de tamaño en la costa del Pacífico Mexicano. *Ciencias Marinas*. 31(1A):11-21 pp.

Lara-Lara, R. 2008. Los Ecosistemas Marinos. Cap5: 135-159 en Soberón J., G. Halffter & J. Llorente. Capital Natural de México. CONABIO, México. 621 p.

Lee, M. A., Y. Chang., K. -W. Lan., J.-W. Chan & W.-J. Hsieh. 2011. Chapter 14. "Satellite observation on the exceptional intrusion of cold water and its impact on coastal fisheries around Peng-Hu Islands, Taiwan Strait". En D. Tang (ed). *Remote Sensing of the Changing Oceans*. Ed. Springer. 423 p.

Legeckis, R. 1986. A satellite time series of sea surface temperatures in the Eastern Equatorial Pacific Ocean, 1986. *Journal of Geophysical Research*. 91(C11):12879-12886.

Levinton, J. S. 2013. *Marine Biology : Function, Biodiversity, Ecology*. 4ta edic. Oxford University Press. 516 p.

Lima I. D., Olson D. B. & Doney S. C. 2002. Biological response to frontal dynamics and mesoscale variability in oligotrophic environments: biological production and community structure. *Journal of Geophysical Research*. vol 107 No. C8, 10.1029/2000JC000393.

Ling D. Tang; & G. Levy. 2011. Editor. *Remote Sensing of the Changing Oceans*. Ed. Springer. 423 p.

Lira J. 1987. *La percepción remota: nuestros ojos desde el espacio*. 3^{era} edic. Fondo de Cultura Económica. 151 p.

Liu, X., M. Wang, & W. Shi. 2009. A study of a Hurricane Katrina-induced phytoplankton bloom using satellite observations and model simulations, *Journal of Geophysical Reserach*. 114, C03023, doi:10.1029/2008JC004934.

Lluch-Cota, S., E. Álvarez-Borrego, E. Santamaría-del Ángel, F. Müller-Karger & S. Hernández-Vázquez. 1997. The Gulf of Tehuantepec and adjacent areas: spatial and temporal variation of satellite derived photosynthetic pigments. *Ciencias Marinas*. 23(3): 329-340 pp.

López- Calderón J., H. Manzo-Monroy, E. Santamaría-del Ángel, R. Castro, A. González- Silvera, & R. Millán-Núñez. 2006. Mesoscale variability of the Mexican Tropical Pacific using TOPEX and SeaWiFS data. *Ciencias Marinas*. 32 (3): 539-549 pp.

López-Sandoval D. C., J.R. Lara-Lara, M. F. Lavín, S. Álvarez-Borrego, & G. Gaxiola-Castro. 2009. Primary productivity in the eastern tropical Pacific off Cabo Corrientes, México. *Ciencias Marinas*. 35 (2): 169-182 pp.

Mann K. H. & J. R.N. Lazier. 1991. *Dynamics of marine ecosystems biological physical interactions in the oceans*. Blackwell Scientific Publications, Inc., Oxford. 466 p.

Magaña Rueda Víctor (Editor). 2004. *Los impactos del niño en México*. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Gobernación. México, 229 p.

Mizobata K, J. Wang, H. Hu & D. Wang. 2011. Chapter 12. "Low Primary productivity in the Chukchi Sea controlled by Warm Pacific Water: A data-model fusion study". En D. Tang (ed). *Remote Sensing of the Changing Oceans*. Ed. Springer. 423 p.

Molina-Cruz A. & M. Martínez-López.1994. Oceanography of the Gulf Tehuantepec, Mexico, indicated by Radiolaria remains. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 110:179-195 pp.

- Monreal M. A. & D. A Salas. 1998.** Dinámica y estructura termohalina, Cap 2:13-26 en M. Tapia-García (Ed) El Golfo de Tehuantepec el ecosistema y sus recursos, UAM-Iztapalapa; México. 240p.
- Park, J.-Y., J.-S. Kug, J. Park, S.-W. Yeh, & C. J. Jang. 2011.** Variability of chlorophyll associated with El Niño–Southern Oscillation and its possible biological feedback in the equatorial Pacific. *Journal of Geophysical Research.* 116, C10001, doi:10.1029/2011JC007056.
- Pérez-Santos, I., W. Schneider, M. Sobarzo, R. Montoya-Sánchez, A. Valle-Levinson, & J. Garcés-Vargas. 2010.** Surface wind variability and its implications for the Yucatan basin-Caribbean Sea dynamics. *Journal of Geophysical Research.*, 115, C10052, doi:10.1029/2010JC006292.
- Platt, T. C., & S. Sathyendranath. 1988.** Oceanic primary production: Estimation by remote sensing at local and regional scales. *Science.* 241, 1613–1620.
- Platt, T., C. Fuentes-Yaco, & K. T. Frank. 2003.** Spring algal bloom and larval fish survival. *Nature.* 423, 398– 399, doi:10.1038/423398b.
- Platt, T. C., Harrison W.G., Lewis M. R., Li W. K. W., Sathyendranath S., Smith R. E. & Vezina A. F. 1989.** Biological production of the oceans: the case for a consensus. *Marine Ecology Progress Series.* Vol 52: 77-88 p.
- Ramos C. S. 2001.** Evaluación de la pesquería de huachinango *Lutjanus peru* en la zona costera de Salina Cruz, Oaxaca, México, durante 1995. *INP. SAGARPA. México. Ciencia Pesquera No. 15.*
- Rudorff, F. T. B; Y. E. Shimabukuro & J. C. Ceballos. 2007.** O sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil. Ed. Parêntese. São Paulo, Brasil. 423 p.
- Ruíz-Durá, M. F. 1993.** Recursos pesqueros de las costas de México: su conservación y manejo socio-económico. Ed. Limusa. 283 p.
- Sharp D. Gary. 2004.** Cambio climático y pesquerías regionales en el futuro: Análisis en colaboración. *FAO documento Técnico de Pesca.* 246 p.
- Samuelson A. & J.J.O'Brien. 2008.** Wind-induced cross-shelf flux of water masses and organic matter at the Gulf of Tehuantepec. *Deep Sea Research.* I (5): 221-246 pp.
- Santamaría-Miranda A., J. F. Elorduy-Garay, Marcial Villalejo-Fuerte & Agustín A. Rojas-Herrera. 2003.** Desarrollo gonadal y ciclo reproductivo de *Lutjanus peru* (Pisces: Lutjanidae) en Guerrero, México. *Revista de Biología Tropical.* 51(2): 489-502 pp.
- Stewart S. 2010.** National Hurricane Center (ed). Tropical Depression One_E Advisory 1. Centro Nacional de huracanes (ed) Tropical Storm Agatha Wind History.
- Stewart S. & T. Kimberlain. 2010.** Centro Nacional de Huracanes Tropical Storm Agatha Discussion Two.
- Stumpf H. G. 1975.** Satellite detection of upwelling in the Gulf of Tehuantepec, México. *J. Phys. Oceanog.* 5:383-388 pp.

Su J., J. Wang; T. Pohlmann & D. Xu. 2011. "The influence of meteorological on the upwelling system off eastern Hainan during summer 2007-2008." *Oceans Dynamics*. 61: 717-730 pp.

Sumich J. & J. Morrisey. 2004. Introduction to the biology of marine life. 8^{va} edic. Jones and Bartlett publishers. 450p.

Tapia – García, M. 1999. El Golfo de Tehuantepec: el ecosistema y sus recursos. Universidad Autónoma de Iztapalapa. 240p.

Tapia - Garcia; Garcia-Abad; A. Carranza-Edwards & F. Vazquez-Gutierrez. 2007. Environmental characterization of the continental shelf of the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Geofísica Internacional*. Vol. 46, Num. 4, pp. 249-260 pp.

Taucher J. & A. Oschlies. 2011. Can we predict the direction of marine primary production change under global warming? *Geophysical Research Letters*. Vol 38. L02603. doi:10.1029/2010GL045934.

Townsend, D. 2012. Oceanography and marine biology an introduction to marine science. Sinauer Associates Publishers. 512 p.

Trasviña A., E. D. Barton, J. Brown, H. S. Velez P. M. Kosro, & R. L. Smith. 1995. Offshore wind forcing in the Gulf of Tehuantepec, Mexico: The asymmetric circulation. *Journal of Geophysical Research*. Vol 100 (10):20,649-20,663 pp.

Trasviña A. & E. D. Barton. 1997. Los "Nortes" del Golfo de Tehuantepec: la circulación costera inducida por el viento. En M. F. Lavín (ed) Contribuciones a la Oceanografía Física en México. Mon No. 3, Unión de Geofísica Mexicana. 25-46 pp.

Trasviña A; E. D. Barton; H. S. Vélez & J. Brown. 2003. Frontal subduction of a cool surface water mass in the Gulf of Tehuantepec, México. *Geofísica Internacional*. Vol 42:1. 101-114 pp.

Turner G. M. M. 1992. Estudio oceanográfico en algunos parámetros físicos y químicos de la zona de surgencias del golfo de Tehuantepec, en los meses de mayo y noviembre. **Tesis licenciatura**. Escuela Nacional de Estudios Profesionales Zaragoza, UNAM, México. 37p.

Uitz, J. H. Claustre, B. Gentili, & D. Stramski. 2010. Phytoplankton class-specific primary production in the world's oceans: Seasonal and interannual variability from satellite observations. *Global Biogeochemical Cycles*. vol. 24. GB3016. doi: 10.1029/2009GB003680.

Velázquez-Muñoz F. A., J.A. Martínez, C. Chavanne, R. Durazo, & P. Flament. 2011. Wind-driven coastal circulation in the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Ciencias Marinas*. 37(4A): 443–456 pp.

Zhan, H. 2008. Scaling in global ocean chlorophyll fluctuations. *Geophysical Research Letters*. 35: L01606, doi:10.1029/2007GL032078.

Páginas de internet:

<http://www.conapesca.sagarpa.gob.mx/wb>

ERDDAP: <http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/griddap/>

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

ftp://lectura:avhrrlec@200.12.166.180/Operational_Satellite_Products/MODIS/Ocean_Products/

USGS: <http://lpdaac.usgs.gov/main.asp>

<http://www.inapesca.gov.mx>