

Procesos físicos que influyen en la productividad biológica de los mares mexicanos



En pocos lugares es tan patente la relación entre seres vivos y medio, como en el mar. Fenómenos como El Niño, las surgencias, los ciclones o las descargas de ríos afectan en forma importante la productividad de los ecosistemas marinos.

David Alberto Salas de León y María Adela Monreal Gómez

INTRODUCCIÓN

Existe en la actualidad, a nivel mundial, una enorme preocupación por el comportamiento de las pesquerías; las estadísticas muestran una fuerte caída en los volúmenes de captura. Sin embargo, se ha observado también un declive en especies que no son explotadas comercialmente. Algunos investigadores consideran que si bien las artes de pesca, redes u otros tipos de instrumentos para captura no están actuando directamente sobre las especies no comerciales, sí influyen en el medio sobre el cual actúan. Las pesquerías de los cardúmenes, los camarones, los moluscos, etcétera, son el resultado de una compleja interacción entre éstos y organismos más pequeños como el fitoplancton y el zooplancton, de los cuales se alimentan. Estos últimos son afectados fuertemente por las condiciones del medio. Por otro lado, se ha observado que eventos asociados a la variabilidad climática como El Niño y La Niña pueden afectar la productividad biológica en los mares; ejemplo de ello es la espectacular caída de la pesquería de anchoveta en las costas de Perú

y Chile durante El Niño de 1982–1983 (Cavides y Fik, 1993).

La hidrodinámica es primordial en la estructuración de los ecosistemas marinos. En el océano, las interacciones físico-biológicas controlan la transferencia de energía del medio hacia los organismos (Legendre y colaboradores, 1985). Las variaciones en el ambiente marino tienen fuertes consecuencias sobre la distribución y abundancia de los recursos vivos en el mar; con frecuencia sus efectos se investigan para establecer las bases en el uso apropiado de dichos recursos. Se ha observado que las estructuras oceanográficas físicas, químicas y geológicas condicionan la productividad biológica y el comportamiento de las pesquerías (Bakun, 1996). Es frecuente observar que las regiones de pesca se encuentran asociadas a grandes trazos de la circulación oceánica como las zonas de surgencias, frentes,



Podemos decir que los procesos físicos en el océano ejercen fuertes impactos en la vida marina; favorecen la productividad primaria mediante el transporte de nutrientes desde las aguas subsuperficiales hacia la zona eufótica

oscilaciones de las corrientes (meandros) y giros, entre otros. Podemos decir que los procesos de reproducción de los organismos en el océano están modulados en parte, por las variaciones de las condiciones oceanográficas. Por ejemplo, el transporte por las corrientes influye en la supervivencia de los huevos y larvas de peces. De esta forma, la productividad biológica en los ecosistemas marinos está influenciada por la entrada de energía mecánica en el océano. Esta energía es llamada por algunos “energía auxiliar”, la cual si bien no es usada por los organismos directamente, coadyuva en el almacenamiento de la energía primaria que fluye subsecuentemente al resto de la cadena alimentaria. Por ello podemos decir que los procesos físicos en el océano ejercen fuertes impactos en la vida marina; favorecen la productividad primaria mediante el transporte de nutrientes desde las aguas subsuperficiales hacia la zona eufótica, definida ésta como la capa hasta donde ya sólo se observa el 1 por ciento de la luz que llega a la superficie del mar. El incremento de la productividad primaria se transfiere a lo largo de la cadena trófica y mediante este proceso se da una cascada de energía hacia los organismos marinos mayores, favoreciendo así a las pesquerías (PROMEBIO, 1999).

Los procesos que incrementan la productividad biológica en los océanos se dan a diferentes escalas espacio-temporales. Los mecanismos de inducción de la productividad biológica van más allá de la sola confluencia en el espacio y el tiempo de las células algales y los nutrientes. Para que se dé un aprovechamiento exitoso de los nutrientes por el fitoplancton se requiere de su acoplamiento en las escalas de los procesos físicos que favorezcan esta productividad, ya que sólo los organismos que coinciden en una misma ventana espectral podrán aprovechar exitosamente la energía auxiliar. De esta forma, el acoplamiento evolutivo de los procesos biológicos y físicos es determinante en la productividad en todo ecosistema.

Los aportes continentales, como la descarga de los ríos, promueven la llamada “producción nueva”, la cual se deriva básicamente de los aportes alóctonos de nutrientes, particularmente los nitratos. En aguas oceánicas estratificadas, predominan los nutrientes regenerados; es decir, los compuestos de nitrógeno y fósforo que provienen de los productos de excreción del zooplancton *in situ*, particularmente el amonio, los cuales regresan a formas inorgánicas (remineralización). Estos dos mecanismos se ven favorecidos por diversos procesos hidrodinámicos (PROMEBIO, 1999).

En años recientes se ha observado que las condiciones físicas de los giros y frentes oceánicos tienen fuertes implicaciones en los mecanismos de reclutamiento de las poblaciones de peces pelágicos. Por otro lado, es ampliamente conocido que la variabilidad climática afecta las pesquerías de atún y sardina, no obstante que la forma en que lo hacen no se conozca plenamente.

Los efectos de las corrientes, de las variaciones de temperatura, salinidad, etcétera, sobre la productividad y la distribución de organismos, son muy evidentes durante los eventos de El Niño. Este fenómeno es una manifestación de la variabilidad climática y tiene fuertes implicaciones socio-económicas a nivel global, no sólo en las pesquerías. De hecho en las áreas de surgencias de la Península de Baja California y el Golfo de Tehuantepec, El Niño produce una importante disminución en la productividad biológica.

En el Golfo de México, Golfo de California, Pacífico mexicano y Caribe mexicano, se presenta un gran número de procesos oceánicos de mesoescala (cientos de kilómetros en la horizontal y cientos de metros en la vertical) como surgencias, frentes (por descarga de ríos, geostroficados y por marea), meandros y giros de diferentes tamaños (los frentes geostroficados son las fronteras entre las masas de agua cuyas densidades son muy diferentes y que son afectados por la rotación de la Tierra).

La interacción del océano con la atmósfera produce importantes flujos de vapor de agua que al condensarse se transforman en lluvia; parte de ella regresa al mar por el cauce de los ríos. Durante su recorrido el agua de la lluvia arrastra cantidades considerables de sedimentos y materia orgánica que sirven como alimento al plancton o ayudan a establecer las condiciones óptimas para el crecimiento de algunos organismos que habitan la zona costera durante las primeras etapas de su vida, como el camarón o algunos peces. A estos organismos se les llama estuarino-dependientes, debido a que dependen de la existencia de condiciones estuarinas (baja salinidad) en las primeras etapas de su vida.

LAS SURGENCIAS

A los movimientos ascendentes del agua subsuperficial, (aproximadamente 100 metros), que se presentan en regiones próximas a la costa, generados por el esfuerzo del viento sobre todo en la costa oeste de los continentes, o bien por intensas corrientes u otros factores, se les conoce como surgencias o afloramientos costeros. Las principales regiones de surgencias costeras de México se encuentran en el Pacífico mexicano; en el sistema

Los efectos de las corrientes, de las variaciones de temperatura, salinidad, etcétera, sobre la productividad y la distribución de organismos, son muy evidentes durante los eventos de El Niño

de la corriente de California, en el Golfo de Tehuantepec y en ambas costas del Golfo de California (figura 1). En el Golfo de México las surgencias se presentan en las costas norte y este de la Península de Yucatán (Monreal Gómez y colaboradores, 1999).

En una surgencia, el agua que asciende lleva consigo bajo contenido de oxígeno y grandes cantidades de nutrientes (fosfatos, nitratos, etcétera) que al subir a la zona eufótica desencadenan un rápido incremento de fitoplancton y consecuentemente de zooplancton y de organismos mayores.

Las zonas de surgencias tienen gran importancia tanto desde el punto de vista físico como biológico y económico. Económicamente son muy importantes, ya que representan las regiones de mayor captura de peces comerciales. De hecho, las regiones de surgencias son las más productivas por unidad de superficie en el océano mundial. Comparativamente, el

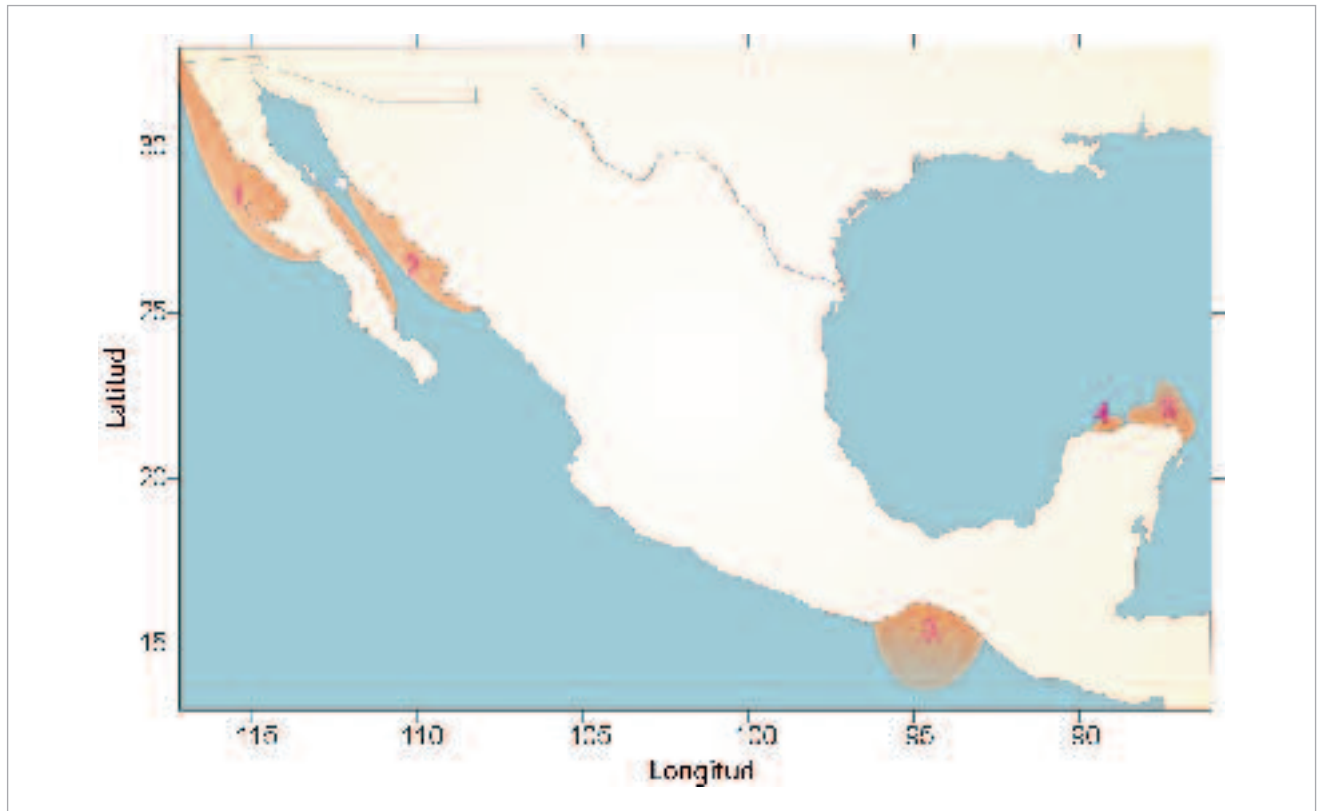


Figura 1. Principales áreas de surgencias costeras en México. Surgencias eólicas de Baja California (1), del Golfo de California (2), del Golfo de Tehuantepec (3), de Yucatán (4) y surgencia topográfica de Yucatán (5).

área total de las regiones de surgencias costeras representan tan sólo el 0.1 por ciento de la superficie de los océanos y producen casi el 50 por ciento de la biomasa total de peces explotada (Bakun, 1996). Por otro lado, la gran abundancia de peces pequeños en las regiones de surgencias soporta una gran variedad de aves y mamíferos marinos, en una complicada trama trófica. Los estudios realizados permiten concluir que dichas regiones son importantes “motores” en el proceso de la productividad biológica en los océanos. Como una de las consecuencias de esta conclusión, se apoyó fuertemente el programa “Cooperativa de Investigaciones Pesqueras Oceánicas de California”, en el estado de California, Estados Unidos, que inicialmente se creó para tratar de entender la caída de la pesquería de la sardina

Monterey en la corriente de California. Este programa efectúa un intenso trabajo de observación y modelación del comportamiento de las pesquerías en las zonas de surgencias de California. En fechas recientes en México se estableció el programa “Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California”, considerado como la contraparte mexicana del de California. Entre sus objetivos está el monitoreo y estudio de la productividad biológica en las regiones de surgencia de la costa oeste de la Península de Baja California.

Las surgencias en la costa occidental de la Península de Baja California son generadas por vientos del nornoroeste durante primavera y verano. Dichas surgencias se presentan principalmente frente a Ensenada y Punta Colonet, en Baja California, y en Punta San Hipólito, en Baja California Sur. En estas regiones, durante la primavera, se concentra la mayor cantidad de cardúmenes y se logran las mejores capturas.

Las surgencias en el Golfo de California son también el resultado de un balance entre el arrastre del viento y la rotación

de la Tierra. En el Golfo de California el campo de vientos tiene una marcada variación estacional y fluye a lo largo de su eje longitudinal, esto debido a la influencia que ejercen las cadenas montañosas que rodean el golfo. Durante el verano los vientos son del sureste, por lo que las surgencias se presentan en el lado oeste del golfo; es decir en las costas de la península. En el invierno los vientos soplan del nornoroeste generando surgencias en la costas de Sonora y Sinaloa. Esta alternancia de las surgencias trae como consecuencia que las pesquerías de algunas especies cambien periódicamente su ubicación. Una pesquería importante asociada a estas surgencias es la de la sardina crínuda (Cisneros y colaboradores, 1990).

Las surgencias en el Golfo de Tehuantepec son el resultado del arrastre del agua superficial por los vientos de invierno o nortes que cruzan desde el Golfo de México y que al pasar a través del Istmo de Tehuantepec se intensifican considerablemente. Estos vientos son localmente llamados “tehuanos” y se presentan principalmente de octubre a abril, con un área de influencia de 200 kilómetros a lo largo de la costa y 500 hacia el mar; a su paso arrastran el agua superficial hacia el sur, causando un déficit de masa que induce un afloramiento o surgencia de agua subsuperficial. Esto ocasiona un aumento en la salinidad y una disminución de la temperatura en la superficie del Golfo de Tehuantepec (Monreal-Gómez y Salas de León, 1998).

Durante un tehuano, como resultado del arrastre del agua por el viento, se espera teóricamente la formación de una surgencia y de un dipolo; esto es, un giro ciclónico y un giro anticiclónico (en un giro anticiclónico el agua gira en la misma dirección en que lo hacen las manecillas de un reloj, y en el ciclónico va en sentido contrario), en el hemisferio norte. En imágenes de temperatura superficial del océano obtenidas desde satélites, se puede observar claramente en el oeste del Golfo de Tehuantepec el giro anticiclónico con un diámetro de aproximadamente 200 kilómetros; su influencia llega hasta los 120 metros de profundidad en su centro, pero el giro ciclónico se percibe muy débil en la parte este y en la mayoría de los casos no se observa. No obstante, en cálculos de las corrientes usando altimetría obtenida desde satélites se pueden observar muy bien ambos giros. Los giros anticiclónicos tienden a “atrapar” material en su centro y a hundirlo; por lo general son zonas de baja productividad. Sin embargo, el giro anticiclónico del Golfo de Tehuantepec en su rotación y translación atrapa las partículas que llegan a la superficie por efecto de la surgencia y las lleva hacia la costa, formando un

En imágenes de temperatura superficial del océano obtenidas desde satélites, se puede observar claramente en el oeste del Golfo de Tehuantepec el giro anticiclónico con un diámetro de aproximadamente 200 kilómetros



angosto “corredor” de condiciones óptimas en la productividad biológica por donde transitan los atunes; esta zona se encuentra frente a Puerto Ángel, Oaxaca. Localmente, al tránsito de los atunes por esta región se le llama “la corrida”, y es aprovechada por la flota atunera para capturarlos.

La surgencia a lo largo de la costa este de la Península de Yucatán quedó en evidencia al tratar de explicar el origen del agua fría al norte de Cabo Catoche. Este afloramiento o surgencia topográfica es resultado del efecto del choque del agua de la capa intermedia que se encuentra aproximadamente a 250 metros de profundidad, que pasa del mar Caribe hacia el Golfo de México. Esta gran cantidad de agua se encuentra con un “escalón” que induce su ascenso casi hasta la superficie. El agua de la surgencia se desplaza desde la capa intermedia hasta la superficie e invade la plataforma; la extensión de la surgencia se puede apreciar mediante el análisis de la topografía de la su-

La concentración de clorofila obtenida de imágenes de satélite muestra la extensión de zonas influenciadas por las surgencias y por los frentes geostróficos

perficie de los 22.5 grados centígrados que corresponde a la termoclina. Este afloramiento se presenta en primavera y verano, cuando ocurre el máximo en la intensidad de la corriente de Yucatán, lo que ocasiona que suba el agua subsuperficial relativamente fría; por ejemplo, la superficie de los 22.5 grados centígrados asciende desde los 220-250 metros hasta una profundidad entre 10 y 70 metros, definiendo así la zona de surgencia, la cual es muy somera al norte de Cabo Catoche (Merino, 1997).

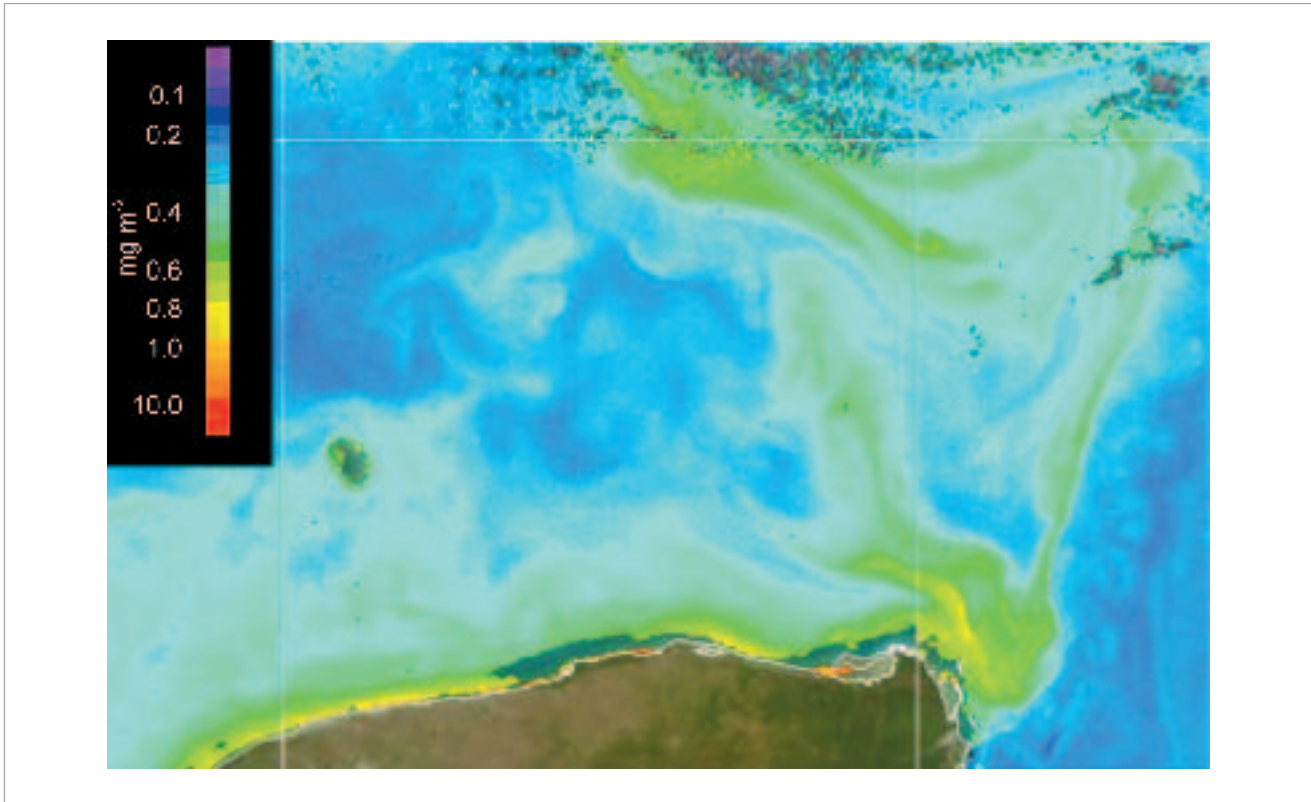
La concentración de clorofila obtenida de imágenes de satélite muestra la extensión de zonas influenciadas por las surgencias y por los frentes geostróficos (figura 2). Al comparar la velocidad de ascenso y la fertilidad de las aguas de la surgencia de la costa este de la Península de Yucatán con regiones de surgencias de la margen occidental de los continentes, por ejemplo con la surgencia de Baja California, se encuentra que la velocidad vertical en la surgencia de Yucatán es similar y en ocasiones mayor, pero que el contenido de clorofila y la productividad es menor. Comparada con las zonas de surgencias de la margen oriental de los continentes, la surgencia de Yucatán ocupa el segundo lugar a nivel mundial; sólo es superada por la surgencia de Somalia. Por otro lado, los vientos en la costa norte de la Península de Yucatán generalmente tienen una fuerte componente del este, excepto en invierno, cuando éstos soplan del norte. El viento del este genera una surgencia eólica en la costa norte de la península.

LAS MAREAS

Las corrientes de marea contribuyen a incrementar la productividad primaria en la plataforma continental mediante la mezcla de la columna de agua, ya que las mareas tienden a transportar material que se encuentra sobre la piconclina hacia la superficie (la piconclina es la capa donde existe el mayor cambio vertical en la densidad); este proceso es muy evidente cuando la onda de marea interactúa con las islas del Golfo de California y puede ser visto desde el espacio mediante imágenes de satélite. Conjuntamente con la mayoría de estos procesos y corrientes se desarrolla una variedad de frentes, en los cuales los diversos mecanismos se combinan para incrementar la productividad primaria y formar parches biológicos.

DESCARGAS POR LOS RÍOS Y GIROS CICLÓNICOS

Existe una fuente importante de nutrientes de tipo alóctona debida al aporte de los ríos, que descargan grandes cantidades



de agua dulce y material en suspensión en la costa, formando zonas con fuertes gradientes de temperatura, salinidad y material en suspensión, también llamadas ergoclinas, las cuales son aprovechadas de muy variadas formas por diversos organismos. En la bahía de Campeche la dinámica está gobernada por procesos físicos que actúan a diferentes escalas, como un giro ciclónico cuya influencia se extiende a toda la bahía, la corriente formada por el agua de la surgencia de Yucatán y la descarga de los ríos y las mareas. No obstante que la amplitud de las mareas es pequeña, su importancia cerca de la costa es grande. Los dos procesos físicos que muestran con mayor claridad el efecto de los procesos oceánicos de mesoescala sobre la productividad biológica en la bahía son el giro ciclónico y los frentes por descarga de los ríos. Cuando se forma un giro ciclónico se observa un ascenso de la piconclina; lo anterior provoca el ascenso de nutrientes que al llegar a la zona eufótica favorecen la productividad biológica de forma similar que en las surgencias. Sin embargo, la parte central de los giros ciclónicos es demasiado turbulenta como para permitir el acceso continuo y eficiente del fitoplancton a los nutrientes. Este proceso se puede ejemplificar mediante la figura 3, en donde la mayor cantidad del fitoplancton se encuentra en la periferia del giro ciclónico de la bahía de Campeche. La turbulencia frena la reproducción y

Figura 2. Concentración de pigmentos fitoplanctónicos (miligramos por metro cúbico) en la surgencia topográfica de Yucatán (NASA/GSFC).

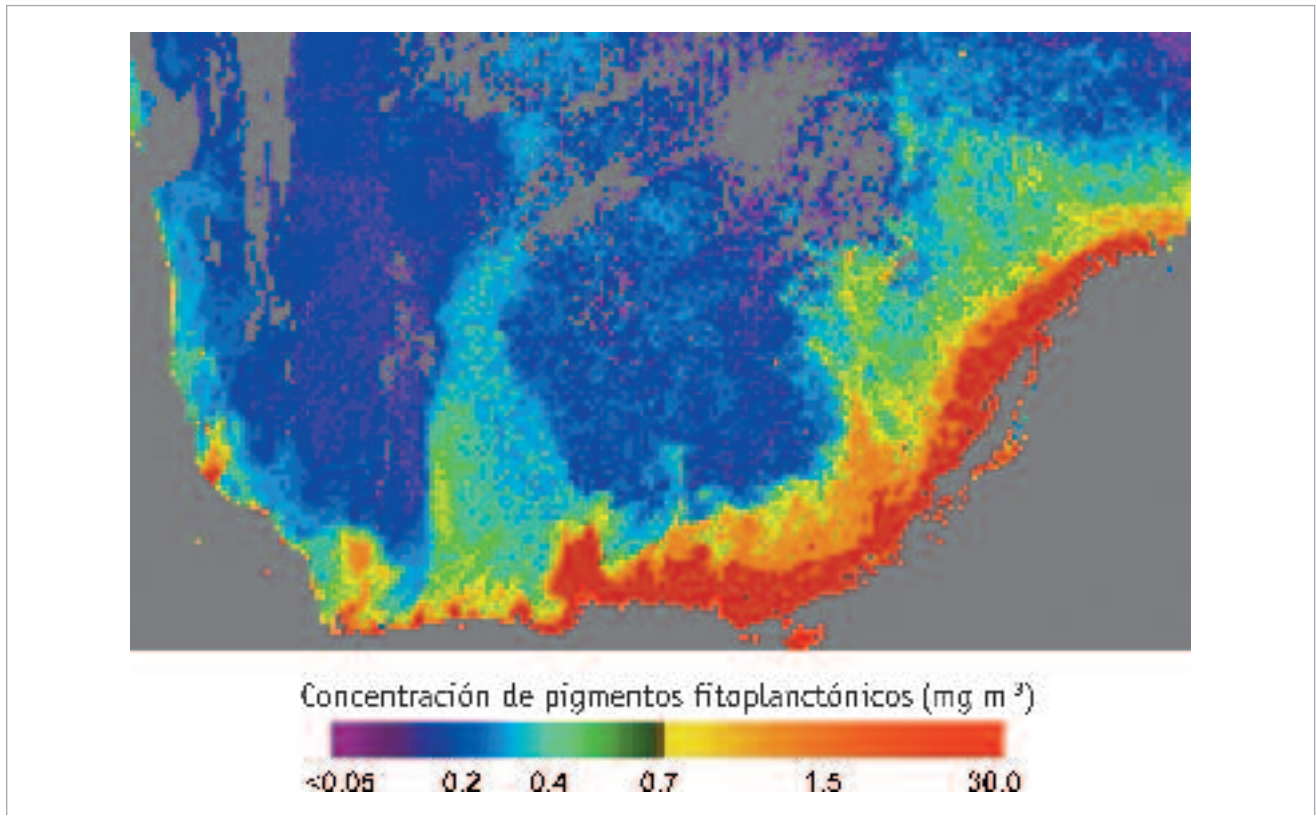


Figura 3. Distribución de fitoplancton en la periferia del giro ciclónico. (http://daac.gsfc.nasa.gov/data/dataset/CZCS/01_Data_Products/01_L1/index.html).

crecimiento de algunas especies del fitoplancton y aumenta sus interacciones y la sedimentación de las células fitoplanctónicas. Por otro lado, favorece los encuentros entre el zooplancton y el fitoplancton y estimula el desarrollo, metabolismo y tasa de ingestión del zooplancton; de esta forma los giros ciclónicos inducen importantes procesos biológicos en sus fronteras más que en sus centros. Debido a su movimiento, el giro ciclónico establece una configuración radial; esto es, sus diferencias se notan en mayor grado del centro a sus bordes; esto produce un reacomodo de las diversas comunidades que inicialmente se encuentran dentro del giro ciclónico y en el agua circundante. Con frecuencia, la composición de organismos fitoplanctónicos en un giro ciclónico es tal que en su centro se encuentran principalmente dinoflagelados, mientras que en su periferia, debido a los procesos de mezcla y a la entrada de silicato, domina una comunidad de diatomeas (Merino y Monreal, 2002).

En la bahía de Campeche se ha observado que existe una estrecha relación entre las corrientes, la abundancia de organismos zooplanctónicos e ictioplanctónicos, la distribución de las comunidades de larvas de peces (Salas de León y colaboradores, 1998) y el fitoplancton.

El patrón de circulación y la concentración de pigmentos fitoplanctónicos durante primavera (figura 4), verano (figura 5)

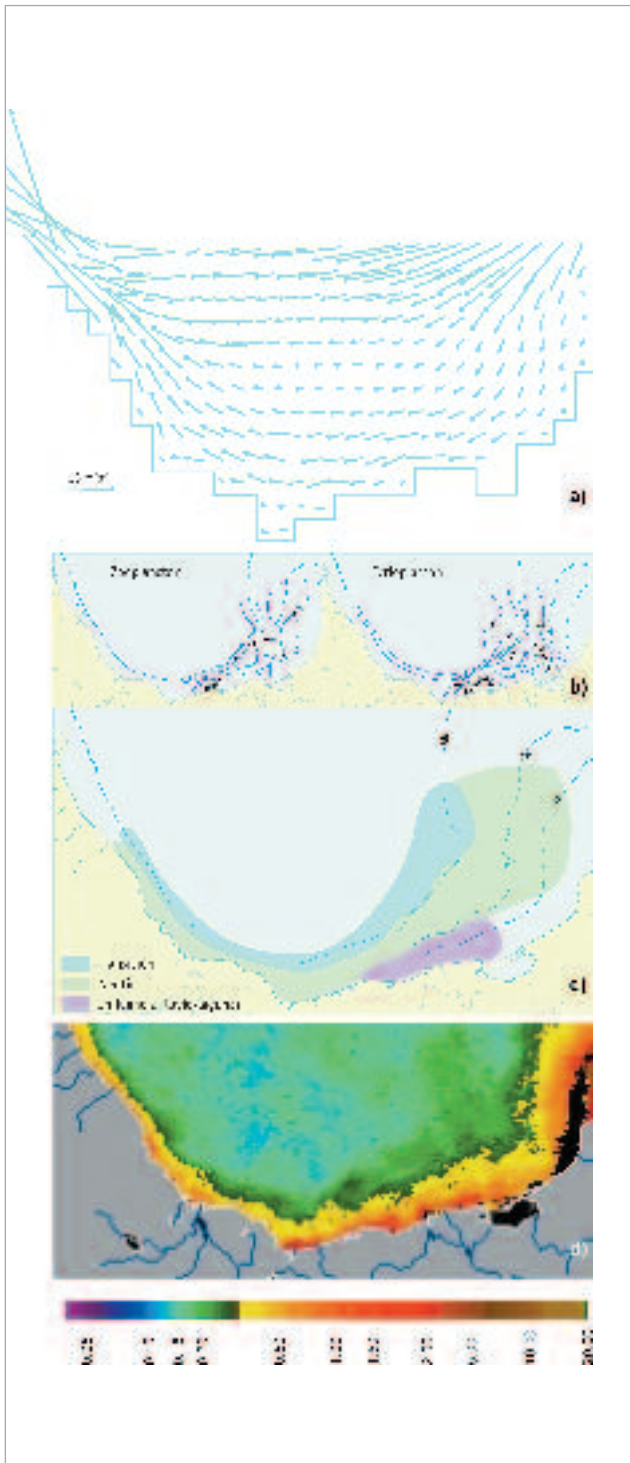


Figura 4. Primavera: *a)* transporte horizontal, *b)* biomasa de zooplancton e ictioplancton, *c)* distribución de comunidades de larvas de peces y *d)* concentración de pigmentos fitoplanctónicos (miligramos por metro cúbico) en la superficie de la bahía de Campeche (modificada de Salas de León y colaboradores, 1998, y de las imágenes del sensor de color de zonas costeras CZCS-Nimbus-7).

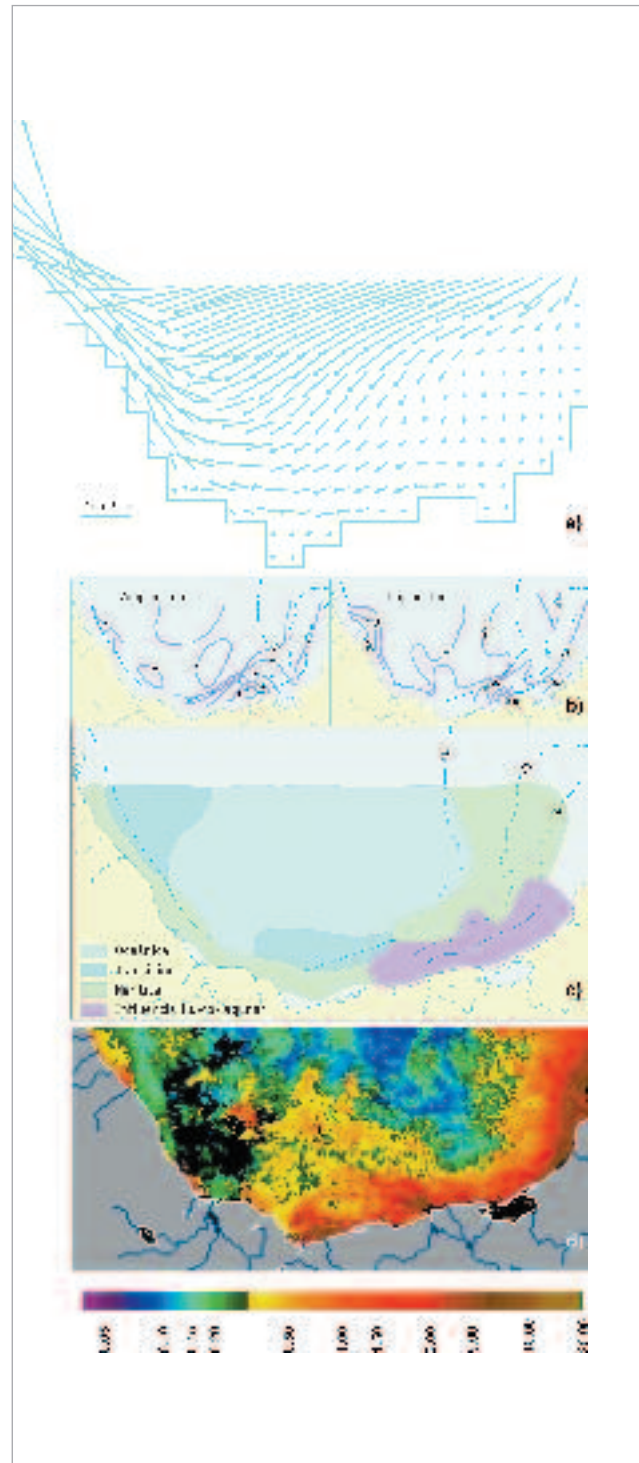


Figura 5. Verano: *a)* transporte horizontal, *b)* biomasa de zooplancton e ictioplancton, *c)* distribución de comunidades de larvas de peces y *d)* concentración de pigmentos fitoplanctónicos (miligramos por metro cúbico) en la superficie de la bahía de Campeche (modificada de Salas de León, 1998, y de las imágenes del sensor de color de zonas costeras CZCS-Nimbus-7).

e invierno (figura 6) muestran la relación entre la dinámica y la productividad biológica de la bahía. El giro ciclónico modula la posición del frente del sistema de ríos Grijalva-Usumacinta, del fitoplancton y de la distribución de las comunidades de larvas de peces. A mesoescala, los frentes y los giros ciclónicos son los principales mecanismos que gobiernan la distribución y abundancia de los organismos planctónicos en la bahía.

A MANERA DE CONCLUSIÓN

Como podemos ver, los principales procesos físicos que influyen en la productividad biológica en los mares mexicanos, a mesoescala, son las surgencias eólicas de la costa oeste de Baja California, del Golfo de California, del Golfo de Tehuantepec y de Yucatán; la surgencia topográfica de Yucatán; los procesos de mezcla por marea en el Golfo de California; las plumas y los frentes formados por las descargas de los ríos, y los giros ciclónicos y anticiclónicos.

Agradecimientos:

Al Conacyt por el apoyo mediante el convenio G 27777 B. A Jorge Castro e Ignacio Palomar por el apoyo técnico.

Bibliografía

- Bakun, A. (1996), *Patterns in the ocean. Ocean processes and marine population dynamics*. California Sea Grant. NOAA y CIBNOR.
- Cavides, C. N. y T. J. Fik (1993), "Modelling change in the Peruvian-Chilean eastern Pacific fisheries", *GeoJournal*, 30(4), 369-380.
- Cisneros, M. A., J. Estrada y G. Montemayor (1990), "Growth, mortality and recruitment of exploited small pelagic fishes in the Gulf of California, Mexico", *Fishbyte*, 8(1), 15-17.
- Legendre, L., W.M. Kemp, H. Atlan, M. Conrad, M. Frechette, P. Lane, T. Platt, G. Rodríguez, J. Tundisi, y C.S. Yentsch, (1985), "Possible holistic approaches to the study of biological-physical

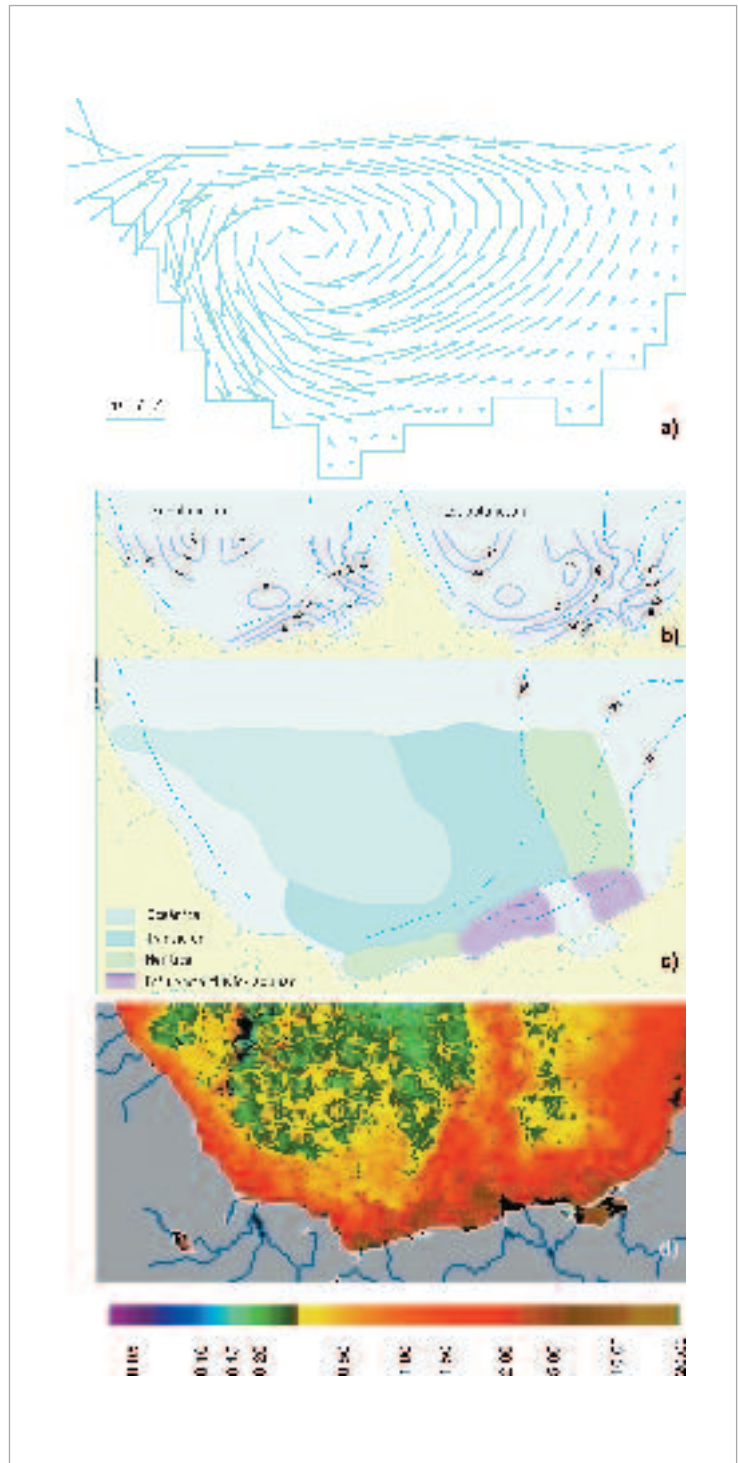
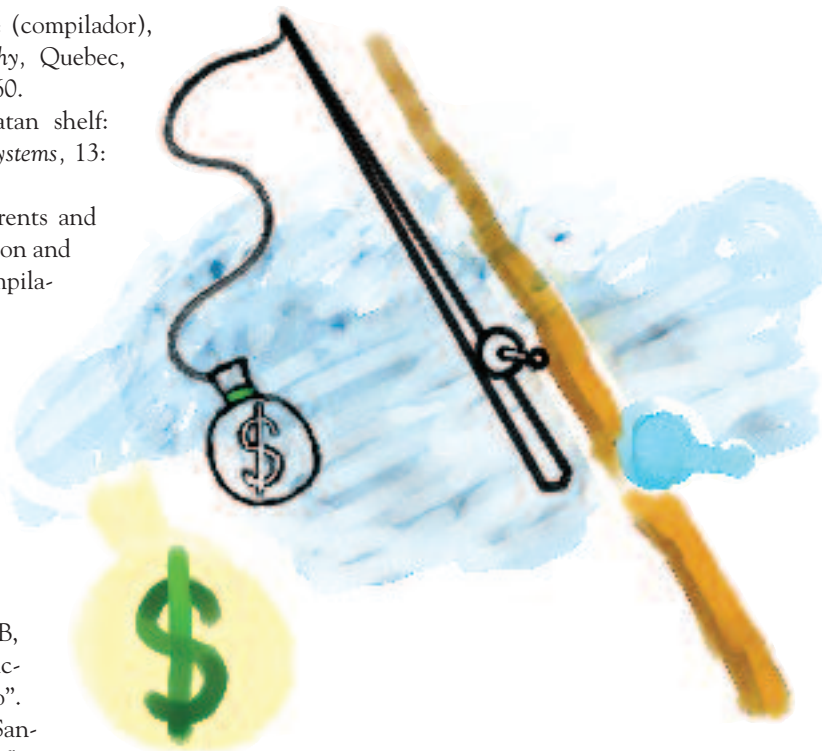


Figura 6. Invierno a) transporte horizontal, b) biomasa de zooplancton e ictioplancton, c) distribución de comunidades de larvas de peces y d) concentración de pigmentos fitoplanctónicos (miligramos por metro cúbico) en la superficie de la bahía de Campeche (modificada de Salas de León y colaboradores, 1998, y de las imágenes del sensor de color de zonas costeras CZCS-Nimbus-7).

- interactions in the oceans”, en L. Legendre (compilador), *Ecosystem Theory for Biological Oceanography*, Quebec, Editora Can. Bull. Fish. Aq. Sci. págs. 213-260.
- Merino, M. (1997), “Upwelling on the Yucatan shelf: hydrographic evidence”, *Journal of Marine Systems*, 13: 101-121.
- Merino, M. y A. Monreal (2002), “Ocean currents and their impact on marine life: nutrient circulation and productivity of the oceans”, en UNESCO (compiladores), *Encyclopedia of life Support Systems*.
- Monreal Gómez, M. A. y D. A. Salas de León (1998), “Dinámica y estructura termohalina”, en M. Tapia García (editor), *El Golfo de Tehuantepec: el ecosistema y sus recursos*, Universidad Autónoma Metropolitana, 13-26.
- Monreal Gómez, M. A., D. A. Salas de León y J. Aldeco Ramírez (1999), “Las surgencias costeras de América”, *Geofísica*, 51, 7-43.
- PROME BIO, 1999, Proyecto Conacyt G-27777-B, “Procesos Oceánicos y Mecanismos de Producción Biológica en el Sur del Golfo de México”.
- Salas de León, D.A., M.A. Monreal Gómez, L. Sanvicente Añorve y C. Flores Coto (1998), “Influencia de la circulación a long terme sur la répartition des organismes zooplanctoniques dans la Baie de Campeche, Mexique”, *Oceanologica Acta*, 21(1), 87-93.



María Adela Monreal Gómez es doctora en oceanología, con especialidad en modelación de procesos oceánicos. Al finalizar sus estudios obtuvo la distinción “Los mejores estudiantes de México (física)” del Ateneo de Letras y Artes. Actualmente es investigadora en el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
monreal@mar.icmyl.unam.mx

David Alberto Salas de León es doctor en oceanología, con especialidad en ondas largas y circulación residual en el océano. Durante los últimos años su interés se centra en la interacción entre la oceanografía física y biológica. Actualmente es investigador en el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM.
salas@mar.icmyl.unam.mx