

# SOBRE EL EFECTO DEBIL DE LAS SURGENCIAS DE VERANO EN LA BIOMASA FITOPLANCTÓNICA DEL GOLFO DE CALIFORNIA

*On the Weak Effect of Summer Upwelling on the Phytoplankton Biomass of the  
Gulf of California*

Eduardo Santamaría-del-Angel<sup>1</sup>, Saúl Álvarez-Borrego<sup>2-3</sup>,  
Roberto Millán-Núñez<sup>1</sup> y Frank E. Müller-Karger<sup>4</sup>.

---

## RESUMEN

El propósito de este trabajo fue caracterizar el efecto de las surgencias de "verano" en la distribución espacial de concentración de clorofila *a* ( $\text{Chl}_{\text{sat}}$ ) y  $T^{\circ}\text{C}$  (TSS) de las aguas superficiales del Golfo de California. Para ello se generaron gráficas de TSS basadas en composiciones semanales de imágenes del sensor AVHRR del satélite NOAA-9, y de  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  basadas en imágenes diarias del CZCS del satélite Nimbus-7, para la zona del Golfo de California al sur de las grandes islas. Las surgencias de verano del Golfo de California tienen un efecto apreciable en la distribución horizontal de TSS y  $\text{Chl}_{\text{sat}}$ , pero es muy débil. Esto se debe principalmente a una estratificación muy fuerte de la columna de agua, con temperaturas superficiales de hasta  $>31^{\circ}\text{C}$ , que disminuye en gran medida el transporte vertical del agua cerca de la costa de Baja California. La TSS tiene una tendencia general de aumentar de la costa occidental del Golfo hacia la oriental, con un gradiente débil de uno a dos grados a través de todo el Golfo (de  $29^{\circ}\text{C}$  en la costa occidental a  $31^{\circ}\text{C}$  en la oriental). Los valores de  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  muestran un gradiente inverso, con valores mayores cerca de la costa occidental del Golfo (hasta  $0.2\text{ mg m}^{-3}$ ) y disminuyendo a  $<0.1\text{ mg m}^{-3}$  frente a la costa oriental. En algunos casos se mostraron lenguetas y remolinos claros, como los remolinos ciclónicos observados en la distribución de TSS con núcleos de  $28^{\circ}\text{C}$ . Una lengüeta de valores relativamente altos de  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  ( $\sim 0.2\text{ mg m}^{-3}$ ) indicó advección de Baja California hacia Sonora en la parte norte de nuestra zona de estudio.

**Palabras clave:** Golfo de California, surgencias, fitoplancton, verano.

---

## ABSTRACT

The objective of this work was to characterize the Gulf of California "summer" upwelling effect on the spatial distribution of surface chlorophyll *a* concentration ( $\text{Chl}_{\text{sat}}$ ) and  $T^{\circ}\text{C}$  (SST) with satellite data. Weekly composites of SST data from the sensor AVHRR imagery (NOAA-9 satellite), and daily  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  imagery from the sensor CZCS (Nimbus-7 satellite) were used to generate graphs with the spatial distribution of these variables for the Gulf of California region to the south of the midriff islands. The Gulf of California summer upwelling has an appreciable effect on the horizontal distribution of SST and  $\text{Chl}_{\text{sat}}$ , but it is very weak. This is mainly due to a very strong water column stratification, with surface temperatures up to  $>31^{\circ}\text{C}$ , which greatly decrease vertical water transport near the Baja California coast. SST has a general tendency to increase from Baja California to the eastern coast, with a weak gradient of one to two degrees through the whole Gulf (from  $29^{\circ}\text{C}$  off Baja California to  $31^{\circ}\text{C}$  off the eastern coast).  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  shows an inverse gradient, with higher values off the western coast (up to  $0.2\text{ mg m}^{-3}$ ) and decreasing to  $<0.1\text{ mg m}^{-3}$  off the eastern coast. In some cases there were very

1. Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada, Baja California, México.

2. Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Ensenada, Baja California, México.

3. CICESE, Departamento de Ecología, Ensenada, Baja California, México.

4. University of South Florida, Department of Marine Science, St. Petersburg, FL, USA.

clear plumes and eddies, such as the cyclonic eddies observed on the SST distribution, with core values of 28 °C. A  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  plume with relatively high values ( $\sim 0.2 \text{ mg m}^{-3}$ ) indicated advection from Baja California towards Sonora in the northern part of our study area.

**Key words:** Gulf of California, upwelling, phytoplankton, summer.

### Introducción

Desde hace tres décadas se ha manejado el concepto de que en el Golfo de California se presentan surgencias costeras en la costa continental con condiciones de "invierno" y vientos noroestes (diciembre a mayo), y en la costa peninsular con condiciones de "verano" y vientos del sureste (julio a octubre), con junio y noviembre como períodos de transición (Roden, 1964). Aunque existen trabajos que han documentado el efecto intenso de las surgencias de invierno que producen biomasa fitoplanctónicas elevadas (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991; y otros citados por ellos), hay poca información sobre este efecto en verano. Los cruceros oceanográficos han sido relativamente escasos en verano en el Golfo, y en pocos se han tomado muestras para concentración de clorofila (Chl) o abundancia de fitoplancton.

Uno de los problemas básicos de la oceanografía física y biológica es el examen sinóptico de las propiedades de una región oceánica. En el mar se puede estudiar intensamente el área pequeña alrededor del barco, pero no hay capacidad para compararla con condiciones que ocurren simultáneamente a 5 ó 100 km de distancia. Los sensores orbitando en satélites han extendido nuestra pequeña área de estudio proporcionando la habilidad para observar repetidamente regiones grandes del océano.

Santamaría-del-Angel *et al.* (1994) utilizaron datos del Coastal Zone Color Scanner (CZCS) para describir la variación estacional e interanual de la concentración de clorofila *a* ( $\text{Chl}_{\text{sat}}$ ) en el Golfo de California. Estos autores concluyeron que existe una variación estacional muy clara, con los máximos de  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  en "invierno" y mínimos en "verano" aún en la costa occidental del Golfo. Las  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  máximas de "invierno" cerca de la costa de Baja California, con valores hasta  $> 10 \text{ mg m}^{-3}$ , se deben a la circulación en forma de remolinos que acarrea las aguas de surgencia de la costa oriental a la occidental (véase Emilsson y Alatorre, 1997; y Lavín *et al.*, 1997). También concluyeron que el efecto de las surgencias de "verano" no es evidente en las imágenes del CZCS. Un problema que ocurre con estas imágenes de satélite de falso color es que se pierde el detalle de las bajas concen-

traciones al asignar una paleta a la escala de  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  para cubrir intervalos amplios de variación. Reasignando una paleta de colores para enfatizar los valores bajos de  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  de "verano", se pueden describir los efectos mucho más débiles de las surgencias de este período en el Golfo.

El propósito de este trabajo es caracterizar el efecto de las surgencias de "verano" en la distribución espacial de  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  y  $T^{\circ}\text{C}$  de las aguas superficiales del Golfo de California, mediante el uso de imágenes del CZCS reprocesadas y del AVHRR. Se muestra que existe un efecto apreciable aunque débil de las surgencias en la costa de Baja California, con valores consistentemente mayores de  $\text{Chl}_{\text{sat}}$ , y menores de  $T^{\circ}\text{C}$ , en la parte occidental del Golfo, con relación a los de la oriental.

### Material y métodos

El sensor CZCS voló a bordo del satélite Nimbus-7 y generó datos de pigmentos fotosintéticos del océano en 1978-86. El Goddard Space Flight Center de la NASA terminó el procesado en 1990. Para este estudio se utilizaron imágenes del archivo BROWSE con información de este sensor, con tamaño de elemento de fotografía (fotel) de  $4 \times 4 \text{ km}^2$ . En 1997 la NASA puso en órbita el SeaWiFS, un nuevo sensor del color del océano, pero hasta ahora la información del CZCS sigue siendo la más completa para describir cambios estacionales e interanuales.

Se generaron gráficas de distribución espacial de  $T^{\circ}\text{C}$  superficial (TSS) con base en composiciones semanales de imágenes del sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) del satélite NOAA-9 y de  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  con base en imágenes diarias del CZCS, para la zona del Golfo de California al sur de las grandes islas. Los detalles del procesado de las imágenes se describen en Müller-Karger *et al.* (1991). Por la fuerte absorción de la radiación en el infrarojo por el agua, los valores de TSS representan la temperatura de una película superficial muy delgada; y por la fuerte atenuación de la luz visible por los componentes ópticos del agua de mar, los valores de  $\text{Chl}_{\text{sat}}$  representan un promedio "sui generis" de las concen-

traciones de clorofila de los primeros metros de la capa eufótica (Kirk, 1983). Otra limitación de este tipo de sensores es que la amplia cobertura de nubes en verano, en el sur del Golfo de California, a menudo imposibilita la obtención de información.

## Resultados

La figura 1 muestra un par de ejemplos de eventos de surgencia de "verano" correspondientes a principios de septiembre de 1983 y mediados de agosto de 1985. En ambos casos la TSS tiene una tendencia general de aumentar de la costa de Baja California hacia la costa oriental, con un gradiente débil de uno a dos grados a través de todo el Golfo (de 29 °C en la costa occidental a 31 °C en la oriental). Los valores de  $Chl_{sat}$  muestran un gradiente inverso, con cifras mayores cerca de la costa de Baja California, hasta  $0.2 \text{ mg m}^{-3}$ , con disminución hasta  $<0.1 \text{ mg m}^{-3}$  frente a la costa oriental.

Sin embargo, este tipo de cambio no fué uniforme. En algunos casos se mostraron lenguetas y remolinos muy claros, como los remolinos ciclónicos que se observan en la distribución de TSS de septiembre de 1983 (Fig. 1a), uno ligeramente al sur de la línea que une Bahía Concepción y Guaymas; el otro, frente a Bahía de La Paz. Estos remolinos tuvieron núcleos de 28 °C rodeados de agua de hasta 31 °C. En agosto de 1985, este tipo de remolinos se manifestó como rasgos más débiles, con TSS de 29 y 30 °C en el núcleo (Fig. 1b). Además hubo lenguetas como la de TSS relativamente baja en agosto de 1985 en el norte (Fig. 1b) y la de valores relativamente altos de  $Chl_{sat}$  (hasta  $>0.2 \text{ mg m}^{-3}$ ) que se manifestó en septiembre de 1983 en la parte norte, desplazándose de Baja California hacia la costa del estado de Sonora (Fig. 1c). A pesar de que en general hubo cierta correlación inversa entre TSS y  $Chl_{sat}$ , no hubo covariación en el caso de lenguetas y remolinos, los cuales fueron características que se presentaron separadamente para ambas variables.

## Discusión

Cuando se realizó la calibración del CZCS se incluyó una fracción grande de datos del Golfo de California (Gordon *et al.*, 1983). Esto implica que los valores de  $Chl_{sat}$  del Golfo son más cercanos a las concentraciones superficiales reales de clorofila *a* que en los casos de regiones oceánicas no incluidas en la calibración. Los datos del CZCS pueden tener una imprecisión de hasta 35% en los valores bajos de  $Chl_{sat}$  (Gordon *et al.*,

1983). Sin embargo, sus series de tiempo son muy consistentes; sus ciclos estacionales y su variación espacial se comportan muy de acuerdo con la fenomenología física, como el movimiento de masas de agua y la ocurrencia de eventos de surgencia (Zuria-Jordán *et al.*, 1995). Esto es especialmente aplicable al Golfo de California donde no hay un aporte significativo de material en suspensión y en solución por ríos.

En verano, con vientos del sureste, el agua Superficial del Pacífico Tropical Oriental, caliente y oligotrófica, penetra en el Golfo de California por lo menos hasta las grandes islas. En invierno esta masa de agua invade sólo la región de la boca del Golfo (Alvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979). La penetración de esta agua caliente cada verano hace un efecto en el Golfo similar al de El Niño en la biomasa fitoplanctónica de las aguas frente a lugares como la costa peruana. Chavez (1987) indicó que contrario a lo que se creía en el pasado, durante un evento El Niño, los vientos responsables de las surgencias frente a Perú se intensifican, pero la acumulación de agua caliente y pobre en nutrientes, así como una termoclina más profunda, resulta en agua de surgencia que no promueve el crecimiento de fitoplancton. El año 1983 tuvo un evento El Niño y 1985 fué un año sin El Niño. En el Golfo de California no hay diferencia significativa en la biomasa fitoplanctónica entre las dos condiciones, en verano (Fig. 1 c, d).

En el Golfo de California, la magnitud de los vientos surestes del "verano" es similar a la de los noroestes de "invierno" (Candela *et al.*, 1984, 1985), pero el agua está mucho más estratificada en verano, lo cual debe causar surgencias más débiles en esta estación que en invierno. En las partes central y sur del Golfo en verano se requiere de cinco a quince veces la energía para mover una parcela de agua de 100 m a la superficie que en invierno (Cortés-Lara *et al.*, este volumen). Mientras que en invierno el índice de estratificación de la columna de agua, calculado para 0-100 m, es sólo 15 a 30  $\text{J m}^{-3}$  en la parte central del Golfo, y 40 a 60  $\text{J m}^{-3}$  en la parte sur (Gaxiola-Castro *et al.*, 1995), en verano es de 260 a 310  $\text{J m}^{-3}$  en ambas (Cortés-Lara *et al.*, este volumen). El índice de estratificación es:  $\Phi = 1/h[\Sigma(\rho_p - \rho_z)gz\Delta z]$ , donde  $h = 100 \text{ m}$ ,  $\rho_p$  es la densidad promedio del agua de esta columna,  $\rho_z$  es la densidad a la profundidad  $z$ ,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $z$  es la profundidad (negativa hacia abajo),  $\Delta z$  es el incremento de la profundidad para cada sumando, y  $\Sigma$  es la suma de  $h=0$  hasta  $h=100 \text{ m}$  (todo en MKS).

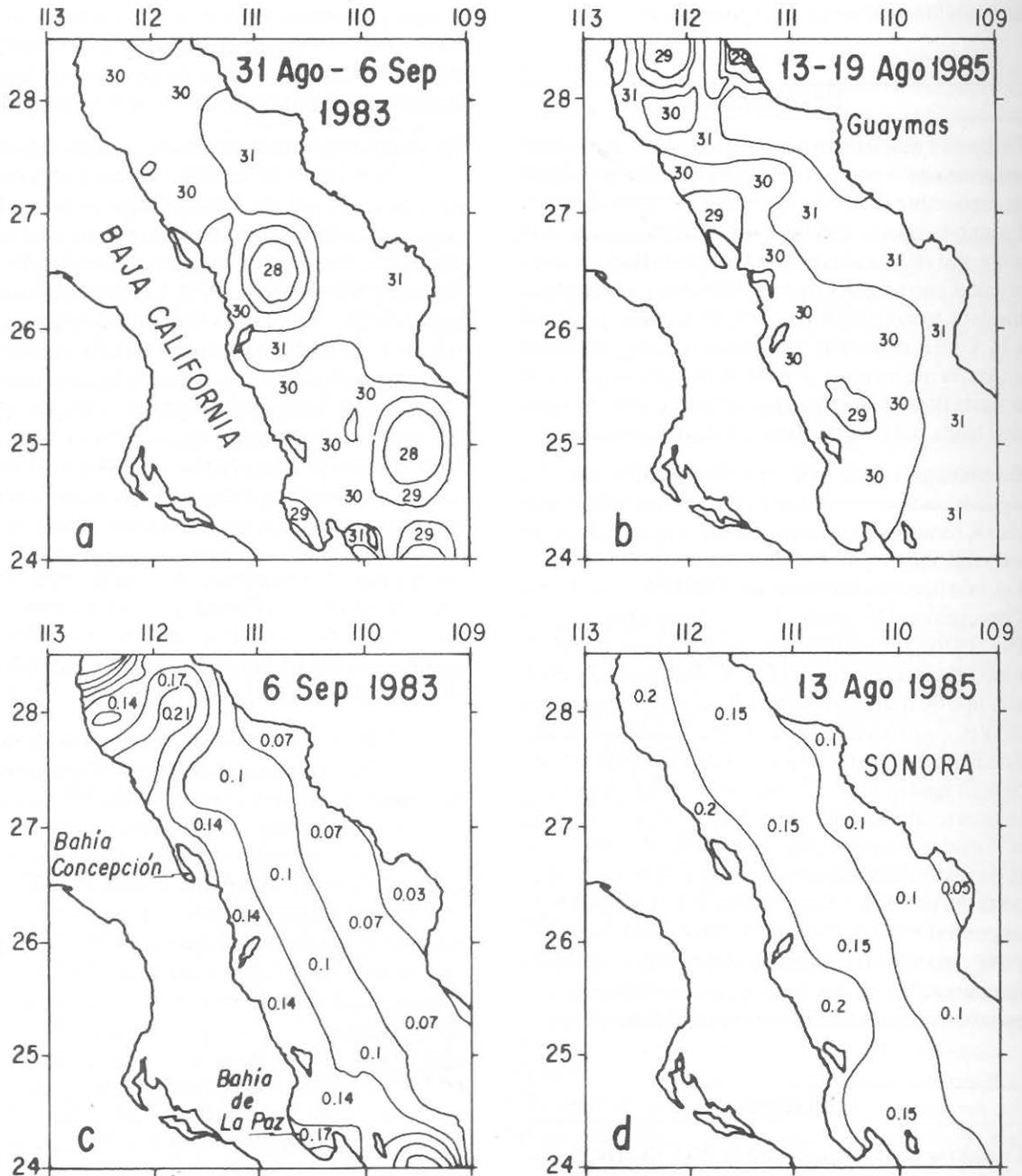


Figura 1. a y b) Distribución de la temperatura superficial (°C); c y d) Distribución de la concentración superficial de clorofila *a* (mg m<sup>-3</sup>). Los datos son derivados de información de satélite para el Golfo de California.

Estos valores mayores de  $\Phi$  para verano causan en parte que las surgencias sean mucho menos intensas que en invierno. El efecto de estas diferencias de  $\Phi$  no se manifiestan en el transporte de Ekman ( $M_E = -\tau/f$ , donde  $\tau$  es la tensión por fricción del viento sobre la superficie del agua, y  $f$  es el parámetro de Coriolis) porque, de acuerdo con Pond y Pickard (1983), la manera como Ekman resolvió el problema de la transferencia de momentum del aire al agua es demasiado simplificada y supone, entre otras cosas, que la columna de agua es homogénea. El transporte de Ekman sobrevalúa grandemente el transporte real de surgencia de verano para la costa occidental del Golfo de California. De acuerdo a la distribución vertical de  $T$  °C (Godínez *et al.*, 1994), el agua superficial de verano con temperatura más baja (TSS=28 °C, Fig. 1 a,b) tiene su origen en una profundidad de sólo 20-45 m, que a menudo sólo incide en la parte muy superior de la nutriclina. Por lo anterior, el agua de surgencia de verano del Golfo de California es de mucho menor volumen, proviene de profundidades mucho menores y tiene menor concentración de nutrientes que las aguas de surgencia de invierno. Otro factor importante es que las temperaturas altas de verano reducen grandemente la capacidad fotosintética del fitoplancton. Behrenfeld y Falkowski (1997) concluyeron que a temperaturas mayores que 22-23 °C la fotosíntesis al óptimo de luz, normalizada por unidad de concentración de clorofila ( $P^B_{opt}$ ), disminuye drásticamente. Los valores de  $P^B_{opt}$  a 28 °C son menores que la mitad de los correspondientes a 22 °C. El conjunto de estos factores explica las densidades fitoplanctónicas bajas de verano del Golfo.

Como se dijo en la sección de resultados, las estructuras mostradas por la distribución de TSS no coinciden con las de  $Chl_{sat}$  (Fig. 1). Esto ha sido observado en otras regiones. Por ejemplo Kuzmic (1991), quien utilizó imágenes del CZCS para corroborar los patrones de circulación superficial predichos por su modelo matemático para el norte del Adriático donde no se mostraban en las imágenes de TSS. En sentido estricto no se puede hacer una comparación directa de nuestras imágenes de TSS y  $Chl_{sat}$ , porque las primeras son promedios para una semana y la segunda es de un día. Para que se presente una covariación clara entre TSS y  $Chl_{sat}$  se requiere que haya fenómenos de advección vertical o de mezcla muy intensos, como las surgencias de invierno en el Golfo, que transporten aguas frías y ricas en nutrientes a la superficie. En estos casos las aguas superficiales más frías a menudo tienen valores más altos de  $Chl_{sat}$ . Esto no se presenta en verano en el Golfo de California. El agua de 28 °C

de los giros ciclónicos (Fig. 1a) no tuvo las concentraciones de nutrientes que se requieren para la proliferación del fitoplancton, y por lo tanto estos giros no se manifestaron como manchas de  $Chl_{sat}$  alta (Fig. 1c). Por otro lado, la lengüeta de valores relativamente elevados de  $Chl_{sat}$ , en el norte del área de estudio en septiembre de 1983 (Fig. 1c), que evidencia un flujo desde la costa occidental hacia la oriental, posiblemente no se manifestó con valores más bajos en la imagen de TSS porque es agua que ya tiene más de unos cuatro días en la superficie, en los que ya ha procedido la reproducción fitoplanctónica y además se ha calentado por absorción de irradiación solar.

En conclusión, las surgencias de verano del Golfo de California tienen un efecto apreciable en la distribución horizontal de TSS y  $Chl_{sat}$ , con valores más bajos de la primera y más altos de la segunda en la costa occidental del Golfo que en la costa oriental, pero es muy débil. Esto se debe principalmente a una estratificación muy fuerte de la columna de agua, con temperaturas superficiales de hasta >31 °C, que disminuye en gran medida el transporte vertical del agua cerca de la costa de Baja California.

### Literatura citada

- Alvarez-Borrego, S. and J.R. Lara-Lara, 1991.** The physical environment and primary productivity of the Gulf of California, p. 555-567. In: J.P. Dauphin and B.R.T. Simoneit (Eds.). *The Gulf and Peninsular Provinces of the Californias*. Am. Ass. Petr. Geol., Memoir 47. 834 p.
- Alvarez-Borrego, S. y R.A. Schwartzlose, 1979.** Masas de agua del Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 6: 43-63.
- Behrenfeld, M.J. and P.G. Falkowski. 1997.** Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnol. Oceanogr.*, 42:1-20.
- Candela, J., A. Badán-Dangon y C.D. Winant, 1984.** *Distribución espacial de variables físicas en las capas bajas de la atmósfera sobre el Golfo de California. Un reporte de datos. Vol. 1. Verano de 1983.* Scripps Inst. Oceanogr. Ref. Series #84-83, La Jolla, CA. 211 p.
- Candela, J., A. Badán-Dangon y C.D. Winant, 1985.** *Distribución espacial de variables físicas en las capas bajas de la atmósfera sobre el Golfo de California. Un reporte de datos. Vol. 2. Invierno de 1984.* Scripps Inst. Oceanogr. Ref. Series #85-11, La Jolla, CA. 303 p.

- Cortés-Lara, M.C., S. Alvarez-Borrego y A.D. Giles-Guzmán, 1998.** Efecto de la mezcla vertical sobre la distribución de nutrientes y fitoplancton en dos regiones del Golfo de California, en verano. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.* 49:
- Chavez, F., 1987.** El Niño y la Oscilación del Sur. *Investigación y Ciencia*, 128: 46-55.
- Emilsson, I. y M.A. Alatorre, 1997.** Evidencias de un remolino ciclónico de mesoescala en la parte sur del Golfo de California, p. 173-182. In: M.F. Lavín (Ed.). *Contribuciones a la Oceanografía Física en México*, Unión Geofís. Mex., Monografía 3. 272 p.
- Gaxiola-Castro, G., J. Garcia-Cordova, J.E. Valdez-Holguin, and M. Botello-Ruvalcaba, 1995.** Spatial distribution of chlorophyll *a* and primary productivity in relation to winter physical structure in the Gulf of California. *Continental Shelf Res.*, 15: 1043-1059.
- Godínez, V.M., M.F. Lavín, S. Sánchez Mancilla, A. Amador Buenrostro, M. Hendershott y K. Richter, 1994.** Campaña oceanográfica DS9008 en el Golfo de California. Serie Ocean. Fís., Comunicaciones Académicas, CTOFT9404, CICESE, Ensenada. 119 p.
- Gordon, H.R., D.K. Clark, J.W. Brown, O.B. Brown, R.H. Evans, and W.W. Broenkow, 1983.** Phytoplankton pigment concentrations in the middle Atlantic Bight: comparison of ship determinations and CZCS estimates. *Appl. Opt.*, 22: 20-36.
- Kirk, J.T.O., 1983.** *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 401 p.
- Kuzmic, M., 1991.** Exploring the effects of bura over the northern Adriatic: CZCS imagery and a mathematical model prediction. *Int. J. Remote Sensing*, 12: 207-214.
- Lavín, M.F., R. Durazo, E. Palacios, M.L. Argote, and L. Carrillo, 1997.** Lagrangian observations of the circulation in the northern Gulf of California. *J. Phys. Oceanogr.*, 27: 2298-2305.
- Müller-Karger, F.E., J.J. Walsh, R.H. Evans, and M.B. Meyers, 1991.** On the seasonal phytoplankton concentration and sea surface temperature cycles of the Gulf of Mexico as determined by satellites. *J. Geophys. Res.*, 96: 12645-12665.
- Pond, S. and G.L. Pickard, 1983.** *Introductory Dynamical Oceanography*. Pergamon Press, New York. 329 p.
- Roden, G.I., 1964.** Oceanographic aspects of the Gulf of California, p. 30-58. In: Tj.H. Van Andel and G.G. Shor, Jr. (Eds.). *Marine Geology of the Gulf of California: a symposium*. Am. Ass. Petr. Geol., Memoir 3. 530 p.
- Santamaría-del-Angel, E., S. Alvarez-Borrego and F.E. Müller-Karger, 1994.** Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *J. Geophys. Res.*, 99: 7411-7421.
- Zuria-Jordán, I.L., S. Alvarez-Borrego, E. Santamaría-del-Angel y F.E. Müller-Karger, 1995.** Estimación de biomasa fitoplanctónica, derivada de datos de satélite, frente a Baja California. *Ciencias Marinas*, 21: 265-280.