

Variabilidad estacional de la productividad primaria y su relación con la estratificación vertical en la Bahía de la Paz, B. C. S.

Seasonal variability of primary productivity and its relation to the vertical stratification in La Paz bay, B. C. S.

¹Amada Reyes-Salinas, ²Rafael Cervantes-Duarte, ³Rubén A. Morales-Pérez y ²José Eduardo Valdez-Holguín

¹Laboratorio de Fitoplancton. Depto. de Plancton y Ecología Marina, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas del Instituto Politécnico Nacional. Apdo. Postal 592, 23000 La Paz, B.C.S., México. E-mail asalinas@redipn.ipn.mx

²Laboratorio de Química Marina. Depto. de Oceanología, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas del Instituto Politécnico Nacional, Apdo. Postal 592, 23000 La Paz, B.C.S., México

³Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinación de Tecnología Hidráulica. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso, 62550 Jiutepec, Mor., México.

Reyes-Salinas, A. R. Cervantes-Duarte, R. A. Morales-Pérez y J. E. Valdez-Holguín, 2003. Variabilidad estacional de la productividad primaria y su relación con la estratificación vertical en la Bahía de la Paz, B. C. S. *Hidrobiológica* 13 (2): 103-110.

RESUMEN

Se estimó la productividad primaria (pp) vía fluorescencia natural en la bahía de La Paz durante octubre de 1996, marzo, abril, mayo, junio, julio, septiembre, noviembre de 1997, y enero de 1998. Simultáneamente a los registros de pp se realizaron perfiles verticales de temperatura (CTD) para determinar la estructura de la columna de agua, y de los cuales se estimó el índice de estratificación (Φ) de 0 a 100 m de profundidad. Durante primavera se observaron los valores promedio más altos de pp ($16 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$) y valores bajos de Φ (50 J m^{-3}) que corresponden a una columna de agua casi homogénea. En contraste, en las subsecuentes estaciones (verano y otoño), la pp decreció a valores mínimos ($2 \text{ y } 5 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$), mientras que Φ se incrementó significativamente ($249 \text{ y } 347 \text{ J m}^{-3}$). Los resultados indican que existe una dependencia lineal de la pp y la mezcla en la columna de agua ($r^2 = 0.62$, $p < 0.05$) durante los meses de verano. Periodos con una alta estratificación tienden posiblemente a inhibir la fertilización de la capa superficial, mientras que una columna de agua bien mezclada facilita el proceso de fertilización. Por lo tanto, es evidente que en la Bahía de La Paz la estratificación asume un papel importante como mecanismo que controla la pp y explica parcialmente la variabilidad estacional observada en la bahía.

Palabras clave: productividad primaria, estratificación, Bahía de La Paz, fluorescencia natural.

ABSTRACT

Primary productivity (pp) during October of 1996, March, April, May, June, July, September, November of 1997 and January of 1998, was estimated via natural fluorescence in La Paz bay. Simultaneously to pp vertical temperature profiles (CTD) were registered to determine the structure of the water column, which was calculated by using the stratification index (Φ) from 0 to 100 m depth. The highest average values in pp ($16 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$) were observed during the spring and the minimum values of Φ (50 J m^{-3}) corresponded to a almost homogeneous water column. In contrast, to other seasons (summer and autumn), the pp fell to minimum values ($2 \text{ to } 5 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$), while Φ increased significantly ($249 \text{ and } 347 \text{ J m}^{-3}$). The results indicated a lineal dependence between pp and water column mixture ($r^2 = 0.62$, $p < 0.05$) during the summer months. Periods with high stratification seem to inhibit the fertilization on the surface layer, while the well mixed water column facilitate the fertilization process. Therefore,

it is evident that the water column stratification in La Paz bay plays an important role mechanism that controls the pp and partially explains the seasonal variability.

Words key: primary productivity, stratification water column, La Paz bay, natural fluorescence.

INTRODUCCIÓN

Se ha establecido que la variabilidad espacio-temporal de la productividad primaria (pp) en los océanos depende de las condiciones ambientales a las cuales están sujetas las poblaciones fitoplanctónicas. Algunos procesos físicos como las surgencias, advección, mezcla turbulenta, ondas internas y remolinos, contribuyen en la variabilidad de la biomasa y pp del fitoplancton, abasteciendo de nutrientes inorgánicos la zona eufótica y permitiendo el acondicionamiento del fitoplancton a diversos regímenes de irradiación. Donde los procesos biológicos de absorción de luz y la capacidad del fitoplancton para procesarla determinan la magnitud de la pp. En los mares mexicanos los trabajos sobre pp han sido escasos y como resultado de estas investigaciones sólo se han caracterizado algunas regiones, como las zonas de surgencias en la costa occidental de Baja California, el Golfo de California, parte del Golfo de Tehuantepec, la sonda de Campeche y la zona del Caribe mexicano (Hernández-Beceñil, 1993).

La Bahía de La Paz es una región de alta importancia pesquera y turística, la mayoría de las investigaciones oceanográficas se han enfocado hacia el estudio de peces y moluscos, así como a la biología de grupos de importancia comercial para el Estado de Baja California Sur. Los trabajos que tienden hacia el conocimiento de la ecología y pp del fitoplancton son pocos. Lavaniegos y López (1997) reportan valores máximos de clorofila ($1.5\text{-}3\text{ mg m}^{-3}$) durante enero con una dominancia de nanofitoplancton, el microfitoplancton fue abundante durante noviembre. La estructura termohalina de la columna de agua presenta marcados cambios estacionales (Jiménez-Illescas, 1996; Zaytsev *et al.*, 1998). Por otro lado Martínez-López *et al.*, (2001) han relacionado la variabilidad estacional de la clorofila con la estructura de la columna de agua. Sin embargo, de los antecedentes que preceden a este estudio se observa la falta de estudios sistemáticos que den a conocer cuál o cuáles factores explican la variabilidad de la pp de la bahía. Por lo tanto, el presente trabajo tiene como objetivo describir la variación temporal de la pp y analizar su relación con la estratificación de la columna de agua.

ÁREA DE ESTUDIO

La Bahía de La Paz es un cuerpo de agua semiprotectido ubicado en el litoral occidental del golfo de California. Cubre

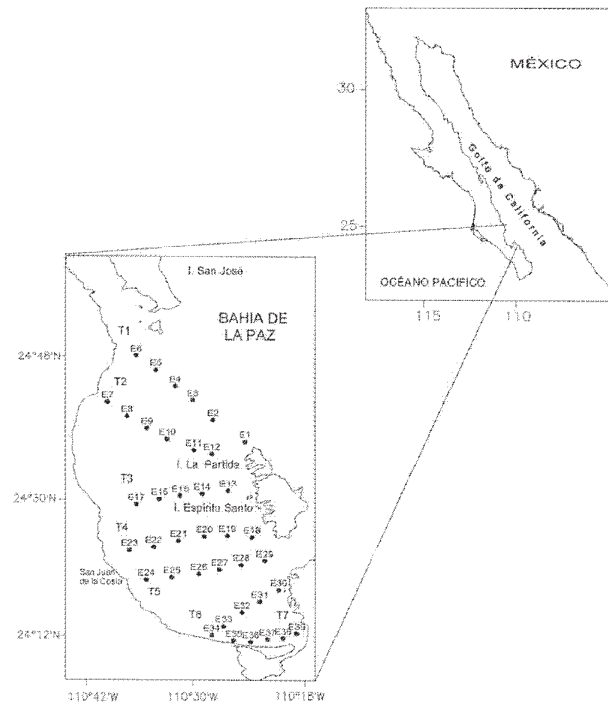


Figura 1. Localización del área de estudio y ubicación de las estaciones de muestreo.

aproximadamente 2635 km^2 y está limitada al oeste y sur por la península de Baja California y al Este por las islas Espíritu Santo y La Partida (Fig. 1). La bahía tiene forma ovalada, con su eje mayor orientado noroeste-sureste que mide aproximadamente 81 km y su eje menor 33 km. Tiene comunicación con el Golfo de California a través de la boca (al noreste de la bahía) y a través del canal San Lorenzo (entre Isla Espíritu Santo y Punta el Coyote). La profundidad máxima es de 400 m y se localiza en la boca de la bahía en la depresión Alfonso (Cruz-Orozco *et al.*, 1989; Cruz-Orozco *et al.*, 1996; García-Pámanes, 1981).

Durante el invierno los vientos dominantes son del noroeste, con intensidades medias de 4 m s^{-1} , en el verano los vientos dominantes son del sur con intensidades medias de $2\text{ a }3\text{ m s}^{-1}$ (Robles Gil-Mestre, 1998; Martínez-López *et al.*, 2001). La bahía presenta un régimen de mareas de tipo mixto semidiurno con un rango mayor a 1 m durante mareas vivas. Las corrientes en la bahía son determinadas principalmente por la marea y éstas son intensas en las partes someras (región sur) y Canal San Lorenzo. Durante el flujo o reflujos de la marea, se han re-

gistrado velocidades máximas cercanas a 1 m s^{-1} en el Canal San Lorenzo y en la parte sur de la bahía (canal de la Ensenada de La Paz). El océano adyacente influencia las aguas de la bahía, en la cual la mayor parte del año es posible detectar Agua del Golfo de California que se caracteriza por su alta salinidad ($S > 35.0$ ups) y temperaturas mayores a los 18°C . Ésta se localiza desde la superficie hasta los 250 m de profundidad (Reyes-Salinas 1999; Reyes-Salinas y Cervantes-Duarte, 1998).

MATERIALES Y MÉTODOS

En una red de 39 estaciones ordenadas en siete transectos que cubren a la bahía en dirección este-oeste (Fig. 1) se realizaron perfiles de profundidad, temperatura y salinidad mediante un CTD InterOcean S4, así como perfiles de fluorescencia natural con un PNF-300 Biospherical Inst., durante los meses de octubre de 1996, marzo, abril, mayo, junio, julio, septiembre, noviembre de 1997 y enero de 1998.

A partir de los datos del CTD se determinó la estructura vertical de la temperatura en la columna de agua y el índice de estratificación (Φ) propuesto por Simpson y Hunter (1974), el cual se define como la cantidad de energía mecánica que se requiere para mezclar totalmente la columna de agua. Los valores asignados en este índice son cero o cercano a cero cuando la columna de agua se encuentra bien mezclada y va incrementándose con el aumento de la estratificación. Por lo tanto, el índice se define como

$$\Phi = 1/h \int_{-h}^0 (\bar{\rho} - \rho)gzdz$$

donde:

ρ es la densidad del agua.

g es la aceleración debido a la gravedad (9.81 m/s^2).

h profundidad de la columna de agua (en este estudio 100 m).

z coordenada vertical (positiva hacia arriba) y

$$\bar{\rho} = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 \rho dz$$

Para estimar la productividad primaria mediante fluorescencia natural se utilizaron las ecuaciones propuestas por Kiefer *et al.*, (1989) y Chamberlain *et al.*, (1990):

$$F_c = \frac{K_{cf} F_f \left(\frac{\Phi_c}{\Phi_f} \right)_{max}}{K_{cf} + E_o}$$

donde:

F_c ($\text{nmol C m}^{-3} \text{ s}^{-1}$) productividad primaria.

K_{cf} ($\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) es el valor de la irradiancia en el cual la razón entre las eficiencias cuánticas es igual a la mitad del máximo, (tomado como 189, valor reportado para el Pacífico Mexicano por García-Mendoza y Maske, 1996)

F_f (moles cuanta $\text{m}^{-3} \text{ s}^{-1}$) es la tasa de fluorescencia natural y se define como:

$$F_f = 4\pi(k + a_{ff})Lu$$

donde:

4π es una constante geométrica, utilizada para transformar la radiancia a volumen de emisión (str^{-1}).

k (m^{-1}) es el coeficiente de atenuación de luz difusa para E_o . El cual fue calculado de los perfiles verticales de la irradiancia escalar (PAR).

a_{ff} (m^{-1}) es el coeficiente de absorción en la banda espectral de emisión de la fluorescencia (tomado como $a_{ff} = 0.49 + 0.012\text{Cl}_a$, valores reportados para el Pacífico Mexicano por García-Mendoza y Maske, 1996).

Lu (moles cuanta $\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ str}^{-1}$) es la radiancia ascendente.

$(\Phi_c/\Phi_f)_{max}$ (átomos de carbono por fotón) se define como el valor máximo de la razón entre las eficiencias cuánticas (tomado como 1.9, valor reportado para el Pacífico Mexicano por García-Mendoza y Maske, 1996).

E_o (moles cuanta $\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) es la irradiancia escalar fotosintéticamente disponible (PAR; 400-700 nm).

De acuerdo con Stegmann *et al.*, (1992) la señal de radiancia ascendente se contamina por la dispersión elástica de la luz del sol cerca de la superficie. García-Mendoza y Maske (1996) estimaron una contribución de esa dispersión de alrededor de 5% a los 6 m, llegando a ser mínima (aprox. 1.5%) a los 10 m, por lo que, puede despreciarse a profundidades mayores. Con base a lo anterior sólo se presentan los valores de pp a partir de los 5 m de profundidad (superficiales) y los valores promedio de la productividad primaria integrada (ppin) desde los 5 m hasta la base de la zona eufótica (1% de Radiación Fotosintéticamente Disponible [PAR, por sus siglas en inglés]).

Para la representación gráfica de las isotermas registradas durante el periodo de muestreo se seleccionó una estación central (E15) de la bahía ya que ésta refleja el comportamiento general del área de estudio. En la discusión se toman en cuenta todas las estaciones examinadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Temperatura superficial

En la Bahía de La Paz la distribución superficial de la temperatura es generalmente uniforme. Especialmente exis-

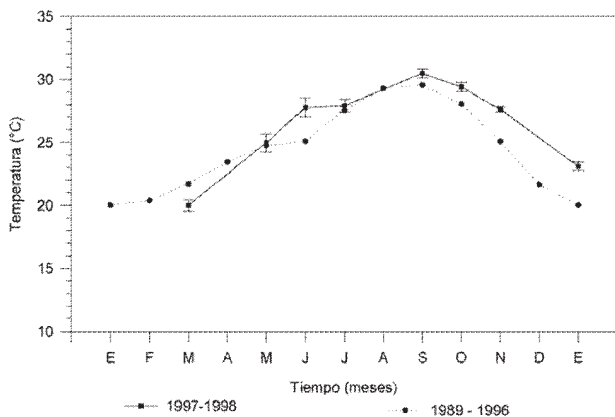


Figura 2. Promedios y desviaciones estándar de la temperatura superficial durante el muestreo y serie de tiempo de 1989 a 1996 tomada de De Silva-Dávila 1997.

ten ligeras variaciones en la parte somera (sur de la bahía) y Canal de San Lorenzo las cuales son debidas a la mezcla inducida por la turbulencia derivada de la interacción de las corrientes de marea con el fondo. Las variaciones en la boca norte de la bahía reflejan la influencia del Golfo de California. Durante un ciclo anual la temperatura promedio presenta un comportamiento estacional determinado por el ciclo estacional de la radiación solar sobre la bahía. La temperatura registrada durante el periodo de medición, es similar al reportado por De Silva-Dávila (1997), para el periodo de 1989 a 1996. El cambio a lo largo del año es gradual y las temperaturas mínimas (20°C) ocurren a finales del invierno (febrero) y las máximas (30°C) a mediados del verano (agosto). A finales del año, se registraron temperaturas promedio superiores a los valores promedio reportadas por De Silva-Dávila (1997) para el periodo de 1989 a 1996 (Fig. 2), lo cual pudiera ser atribuido al inicio del evento de El Niño que se presentó durante 1997-1998.

Estructura vertical de la temperatura

La estructura vertical de la temperatura en la bahía muestra claramente la influencia de cambios estacionales durante el año. En la figura 3 se presenta la heterogeneidad anual de la estructura vertical de temperatura (0-150 m) en una estación hidrográfica ubicada en la parte central de la bahía (E15) (Fig.1). El espesor de la capa de mezcla varía a lo largo del año. A principios del año (enero-febrero) el espesor de la capa de mezcla presenta su máxima profundidad (65 m). De marzo a septiembre el espesor de la capa de mezcla disminuye, registrando valores mínimos en abril-mayo cuando la temperatura superficial se incrementa y se establece un marcado gradiente vertical de temperatura de 0 a 70 m. A partir de abril se inicia nuevamente la formación de la capa de mezcla inducida por el viento cuyo espesor comienza a incrementarse de 5-10 m a finales marzo hasta estabilizarse en los

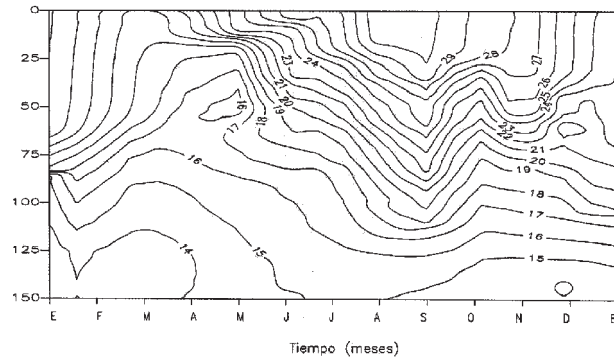


Figura 3. Perfil vertical de temperatura registrada durante el muestreo.

30-40 m de agosto hasta noviembre. Durante agosto es cuando la capa de mezcla alcanza su máxima temperatura (30°C) y decrece hasta su valor mínimo de 20°C en febrero. Esta disminución en la temperatura está asociada a una baja radiación solar en las capas superficiales a finales del verano. El enfriamiento de las capas superficiales produce inestabilidad y por ende, movimientos convectivos que hacen que la capa de mezcla se haga mas profunda. Por lo tanto, a partir de finales del otoño (noviembre) se observa un incremento constante e importante en la termoclina hasta alcanzar su máximo espesor de aproximadamente 65 m a finales del invierno (marzo).

A través del ciclo anual la modificación estacional de la termoclina está determinada por un incremento de la temperatura superficial a partir de abril generando un marcado gradiente, de 15°C entre la superficie y 150 m de profundidad, que inicia el establecimiento de la termoclina a una profundidad promedio de 50 m en verano. En octubre la termoclina comienza a ser erosionada y empujada a una mayor profundidad por procesos convectivos durante el invierno, el gradiente de temperatura entre superficie y 150 m es menor a 9°C. La capa profunda, en la Bahía de La Paz, se puede considerar a partir de los 100 m de profundidad. Ésta, a través del año, permanece casi constante en temperatura, sin embargo, el efecto de las variaciones estacionales también es observado. La diferencia anual de temperatura a 150 m de profundidad es de 1°C (14°C durante invierno y de 15°C durante el verano).

Dinámica de la estructura vertical de temperatura

Las variaciones estacionales de la estructura vertical de temperatura en la Bahía de La Paz se deben a varios factores. Uno de estos factores primordiales es la radiación solar la cual desempeña un papel importante en el calentamiento de la capa superficial durante el verano, cuando la radiación solar es más intensa. Presumiblemente durante el ciclo anual existen ganancias y pérdidas del flujo de calor de la capa superficial de la bahía. Puesto que los flujos de calor están íntimamente

relacionados con las condiciones meteorológicas es de esperar que la estructura termohalina responda a éstas condiciones y presente un marcado ciclo estacional. Aunque no se cuentan con mediciones precisas del flujo de calor a través de la superficie durante un ciclo anual para la Bahía de La Paz, se infiere que durante primavera y verano existe una ganancia de calor y durante el otoño e invierno pérdidas de calor. La respuesta de la temperatura en la columna de agua se observa claramente en la figura 3. A partir de marzo se presenta un incremento constante de la temperatura y la formación de la capa de mezcla, poco profunda. El flujo de calor a la capa superficial persiste hasta el verano (septiembre) y por tanto se mantiene un incremento constante en la temperatura. Asimismo, la acción del viento y el oleaje contribuyen en la distribución vertical del calor a través de la capa de mezcla. Mediciones de viento por la estación meteorológica del CIBNOR, durante los muestreos, indican que en el verano el viento contribuye significativamente a incrementar y mantener la profundidad de la capa de mezcla.

Durante el otoño el calentamiento se reduce provocando una pérdida de calor lo que produce un efecto importante en la circulación termohalina. Generalmente, durante ésta época los vientos se incrementan y la radiación disminuye iniciando la pérdida de calor por la superficie, lo cual produce el proceso de convección vertical y consecuentemente, el incremento o hundimiento de la capa de mezcla. Es por eso que, como se observa en la figura 3, la capa de mezcla en la Bahía se incrementa significativamente durante diciembre y enero (60-70 m). Posteriormente, en primavera la radiación aumenta y los vientos tienden a disminuir su intensidad, por lo que, se inicia nuevamente la estratificación cerca de la superficie. El crecimiento de la capa de mezcla continuará lentamente durante el verano para luego incrementarse más rápidamente durante el invierno.

Índice de estratificación (Φ)

El cambio de la estratificación en la columna de agua al igual que las otras variables presentaron un comportamiento estacional. Los valores mínimos se registraron en los meses de enero y marzo (50 y 78 J m^{-3} respectivamente) y los máximos en el mes de octubre (347 J m^{-3}) (Fig. 4). Los valores de Φ están relacionados directamente al flujo estacional de calor a las capas superficiales en la Bahía de La Paz. De acuerdo con Simpson *et al.*, (1977 y 1978), el parámetro de estratificación presentó cambios estacionales que se ven afectados por 1) el calentamiento de la superficie, 2) la mezcla por mareas y 3) el efecto de los vientos. En la bahía Φ depende principalmente del flujo de calor (pérdida o ganancia) de la capa superficial. Sin embargo, durante el invierno los procesos convectivos asumen un papel importante en el mezclado vertical de la columna de agua (0-150). Mientras que los vientos

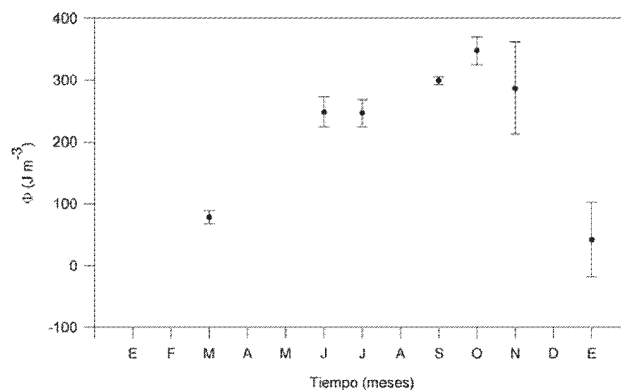


Figura 4. Promedios y desviaciones estándar del índice de estratificación ($\Phi \text{ J m}^{-3}$) durante el periodo de muestreo.

tienden a mantener una capa de mezcla somera durante todo el verano. Puesto que se consideró una estación profunda, la mezcla inducida por la marea no es perceptible.

Productividad primaria (pp)

Los valores de pp a los 5 m determinados para la red de estaciones muestran una tendencia estacional cuyo máximo se localiza en el mes de marzo ($16 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$) así mismo, es el mes que presentó la mayor variabilidad espacial. Posterior a este máximo la pp comienza a decrecer hasta llegar al valor mínimo en el mes de septiembre ($2 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$). Para el mes de octubre se puede apreciar nuevamente un incremento ($5 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$) (Fig. 5).

La pp integrada (ppin) de los 5 m a la base de la zona eufótica parece mostrar también un comportamiento estacional, registrándose valores máximos de marzo a mayo (en abril fue de $138 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Posteriormente, se observó una disminución gradual alcanzando valores mínimos en el mes de noviembre ($55 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Al realizar una prueba de significancia a través de la prueba t de student a un valor $p \leq 0.05$ entre la pp

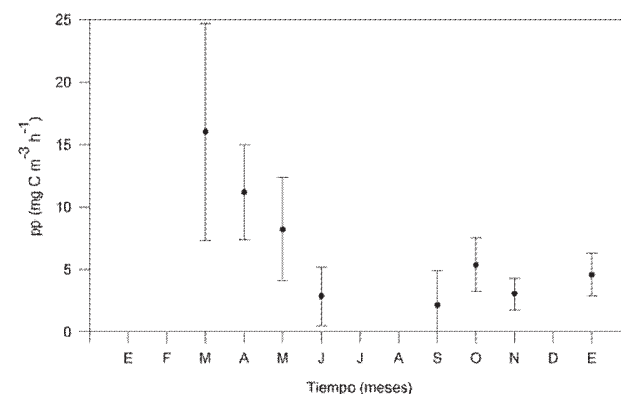


Figura 5. Promedios y desviaciones estándar de productividad primaria.

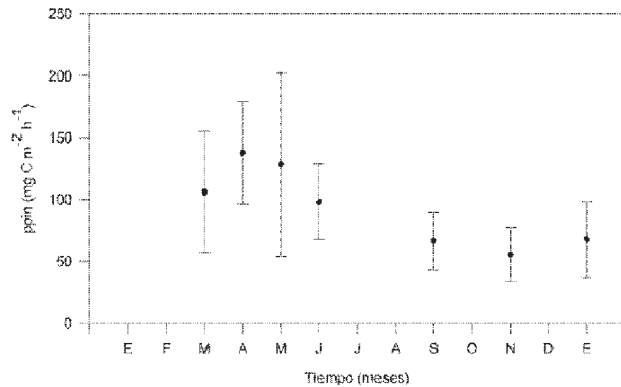


Figura 6. Promedios y desviaciones estándar de productividad primaria integrada desde los 5 m hasta la base de la zona eufótica.

a los 5 m y la pp integrada, se muestra que no difieren significativamente (Fig. 6).

De acuerdo con Santoyo-Reyes (1994) los estudios sobre la producción primaria en las lagunas costeras de México presentan una heterogeneidad en los procedimientos técnicos del análisis de campo, así como, en la dinámica propia de cada lugar, lo que dificulta el establecimiento de valores comparativos. En la laguna de La Paz, Gilmartin y Revelante (1978), Lechuga *et al.*, (1986) y Barreiro-Güemes *et al.*, (1993) registran valores de productividad primaria hasta de 347 mg C m⁻² h⁻¹, sus valores más frecuentes están entre 42 y 125 mg C m⁻² h⁻¹, considerándola como una de las más productivas del Golfo de California. En la Bahía de La Paz el valor máximo promedio se registró en abril (138 mg C m⁻² h⁻¹) en un intervalo entre 16 y 320 mg C m⁻² h⁻¹. Comparando los niveles más frecuentes en ambas zonas se observó que la bahía presenta valores más altos que la laguna, sin embargo, hay que ser cautos con dichas comparaciones, debido a las diferencias espaciales y temporales en los muestreos así como diferencias en las metodologías utilizadas. Aunque, Valdez-Holguín *et al.*, (1995) encontraron que la pp estimada con el método de ¹⁴C y fluorescencia natural se compara bien en el Golfo de California.

La estimación de la productividad primaria vía fluorescencia ha sido documentada por García-Mendoza (1994); García-Mendoza y Maske (1996) para el Pacífico mexicano y Golfo de California. Para este último agrupan las estaciones de acuerdo a los valores de pp medida en menores de 5 mg C m⁻³ h⁻¹ (parte central del golfo, Cuenca Delfín, frente a Mazatlán), de 5 a 10 mg C m⁻³ h⁻¹ (Fosa Wagner y parte sur del Golfo cerca de la costa este) y valores mayores a 10 mg C m⁻³ h⁻¹ (hacia el norte). López-Verdín (1999) reportan valores de pp menores a 5 mg C m⁻³ h⁻¹ para la región de la cuenca de Guaymas, con una variabilidad estacional marcada de verano (mínimos valores con un máximo profundo) a invierno (máximos

valores con un máximo subsuperficial). Otro trabajo que estima la pp vía fluorescencia es el de Espinosa-Carreón (1996) en la bahía de Todos Santos, registrando 20 mg C m⁻³ h⁻¹ como valor máximo en la primavera. Asimismo, se determinó que la pp integrada fue de 100 y 84 mg C m⁻² h⁻¹ durante los meses de mayo y junio, respectivamente. En contraste los valores determinados para la Bahía de La Paz fueron de 128 y 98 mg C m⁻² h⁻¹, para el mismo periodo.

Dependencia de la productividad primaria (pp) a la estratificación (Φ)

Hasta ahora el índice de estratificación estática propuesto por Simpson y Hunter (1974) es el único que ha sido relacionado con los parámetros fotosintéticos del fitoplancton marino. Alvarez-Borrego y Gaxiola-Castro (1988), Gaxiola-Castro (1994), y Gaxiola-Castro *et al.*, (1995) utilizaron el índice de estratificación para relacionarlo con los parámetros fotosintéticos en el norte del Golfo de California. Estos estudios reportaron que los valores promedios de los parámetros fotosintéticos en la zona eufótica se incrementaron cuando el índice de estratificación decreció hasta cierto valor ($\Phi < 15 \text{ J m}^{-3}$). Finalmente, concluyen que la turbulencia moderada en el Golfo de California causa valores más altos en la tasa de fotosíntesis a saturación de luz (P_n) y en la pendiente inicial de la curva P-E (α^{β}) en comparación con la turbulencia fuerte o la estratificación. Por otro lado González-Morales *et al.*, (1993) realizaron un trabajo en la región costera de Baja California en el cual reportan que este mismo índice se relaciona casi linealmente con los parámetros fotosintéticos del fitoplancton mayor de 8 μm , sin embargo, parece no tener ninguna relación con los del fitoplancton menor a 8 μm .

Para la Bahía de La Paz la relación entre el índice de estratificación y la productividad primaria integrada durante todo el periodo de muestreo se presenta en la figura 7. Los datos están dispersos, sin embargo, durante los meses de verano hay una relación significativa ($r^2 = 0.62$, $p < 0.05$). El proceso de fertilización de la zona eufótica en la bahía de la Paz aún no es muy claro. Pese a la dispersión de los datos, y considerando sólo los del periodo de primavera y verano se apreció una relación inversa entre la estratificación y la productividad primaria integrada. En la Bahía el proceso de convección durante el invierno permite la fertilización de las capas superficiales. Por lo que, durante la primavera cuando las condiciones son favorables, en adición a la disponibilidad de nutrientes, se presentan los valores máximos en la productividad primaria y una relativa baja estratificación (Φ). Durante el verano la estratificación se hace más marcada en la columna de agua y la termoclina de verano inhibe el paso de nutrientes a las capas superficiales y por lo tanto, existe una marcada disminución en la productividad de la bahía. Aunque a finales de otoño y durante el invierno existe baja

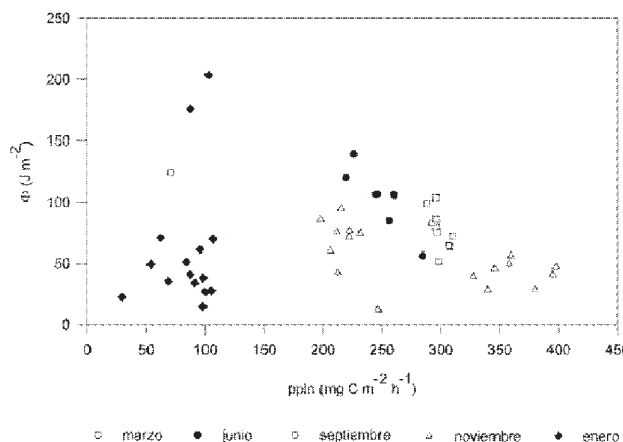


Figura 7. Relación entre ϕ y ppin durante los meses marzo (○), junio (●), septiembre (□), noviembre (△) y enero (◆).

estratificación, las condiciones no son favorables para que se incremente la productividad primaria. Es evidente que existen otros mecanismos de fertilización en la bahía, tales como el efecto de isla y la mezcla por marea en los canales y zonas someras, sin embargo su contribución no ha sido cuantificada. Finalmente se establece que los procesos convectivos que ocurren en la Bahía de La Paz representan un papel importante en la fertilización de las capas superficiales y asimismo la estratificación de la columna agua determina la productividad primaria en la zona profunda de la bahía.

CONCLUSIONES

La Bahía de La Paz es considerada como uno de los cuerpos de aguas más productivos de la costa oriental del Golfo de California. Su circulación es determinada principalmente por las mareas y por los vientos estacionales de la región. La dinámica de la bahía representa un papel importante en su productividad por lo que, con el propósito de establecer los mecanismos que la controlan se llevaron a cabo mediciones sistemáticas de la productividad primaria y de la estructura vertical de la columna de agua. Los resultados obtenidos soportan la hipótesis que señala a la Bahía de La Paz como una zona de elevada productividad fitoplanctónica, comparada con algunas áreas del Pacífico Mexicano y Golfo de California, al menos en ciertas épocas del año. Este aumento en la productividad está relacionado con la dinámica de la columna de agua o estratificación. La estratificación está determinada principalmente por el flujo de calor debido a la radiación solar por lo que, durante el verano las capas superficiales tienden a ganar calor mientras que durante el invierno el proceso se invierte. La pérdida de calor de las capas superficiales durante el invierno produce convección vertical con la consecuente homogeneización y fertilización de la

columna de agua por procesos de mezcla vertical. Asimismo, durante la primavera condiciones favorables permiten un incremento significativo en la pp y el inicio de una mayor estratificación en las capas superficiales debido a una mayor radiación solar. Por lo tanto, es evidente que la variabilidad de la pp está en función de un efecto combinado de los principales factores que la determinan (luz, temperatura, nutrientes), con una fuerte contribución de Φ sobre ésta. Durante el verano la estratificación es máxima y aunque el viento tiende a mezclar las capas superficiales, su efecto no llega a la capa profunda y por lo tanto, no hay un intercambio eficiente que permita fertilizar las capas superficiales durante ésta época. Por lo que, durante el verano se observa una marcada disminución en la pp y una alta estratificación en la columna de agua. De esta manera se concluye que la pp depende de la estructura vertical de la columna de agua.

REFERENCIAS

- ALVAREZ-BORREGO, S. y G. GAXIOLA-CASTRO, 1988. Photosynthetic parameters of the northern Gulf of California phytoplankton. *Continental Shelf Research* 8(1):37-47.
- BARREIRO-GÜEMES, M. T., C. H. LECHUGA-DEVÉZE y J. BUSTILLO-GUZMÁN, 1993. Variabilidad diurna de la producción primaria en la boca de la Ensenada de La Paz, B.C.S. *Hidrobiológica* 3(1-2): 17-27.
- CHAMBERLAIN, W. S., C. R. BOOTH, D. A. KIEFER, J. H. MORROW y R. C. MURPHY, 1990. Evidence for a simple relationship between natural fluorescence, photosynthesis and chlorophyll in the sea. *Deep-Sea Research* 37:951-973.
- CRUZ-OROZCO, R., C. MARTÍNEZ-NORIEGA y A. MENDOZA-MARAVILLAS, 1996. Batimetría y sedimentos de la bahía de la Paz, B.C.S. *Océánides* 11(1): 21-27.
- CRUZ-OROZCO, R., P. ROJO, L. GODÍNEZ y E. NAVA, 1989. Topografía, hidrología y sedimentación de los márgenes de la laguna de La Paz, B.C.S. *Revista de Investigación Científica. UABCS* 8(1): 3-15.
- DE SILVA-DÁVILA, R., 1997. Abundancia y distribución de los eufácidos y producción larvaria de *Nyctiphanes simplex* (Hasne), en la Bahía de La Paz, B.C.S. Tesis de Maestría. CICIMAR-IPN, México. 112 pp.
- ESPINOSA-CARREÓN, L., 1996. Productividad primaria y su relación con algunas variables bio-ópticas en la Bahía de Todos Santos, Baja California, México. Tesis de Maestría. CICESE, México. 157 pp.
- GARCÍA-MENDOZA, E., 1994. Fluorescencia natural y productividad primaria en el Pacífico mexicano. Tesis de Maestría. CICESE, México. 128 pp.
- GARCÍA-MENDOZA, E. y H. MASKE, 1996. The relationship of solar-stimulated natural fluorescence and primary productivity in Mexican Pacific waters. *Limnology and Oceanography* 41(8): 1697-1710.

- GARCÍA-PÁMANES, J., 1981. El fitoplancton de la porción oriental de la Bahía de La Paz, B.C.S., durante primavera y verano. Resúmenes VII Simposio Latinoamericano sobre Oceanografía Biológica. Aca-pulco, Gro., México. 38 pp.
- GAXIOLA-CASTRO, G., 1994. Efectos de algunos procesos físicos sobre la fisiología y productividad del fitoplancton marino. Tesis Doctoral. CICESE, México. 145 pp.
- GAXIOLA-CASTRO, G., J. GARCÍA-CORDOVA, J. E. VALDÉZ-HOLGUÍN y 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 Research* 15(9):1043-1059.
- GILMARTIN, M. y N. REVELANTE, 1978. The phytoplankton characteristics of the barrier Island lagoons of the Gulf of California. *Estuarine Coastal Marine Science* 7(1): 29-47.
- GONZÁLEZ-MORALES, A. T., G. GAXIOLA-CASTRO y R. LARA-LARA, 1993. Daily photosynthetic parameters and biomass from size-fractionated phytoplankton off Baja California. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 36:147-158.
- HERNÁNDEZ-BECERRIL, D. U., 1993. Fitoplancton marino en México. In: SALAZAR-VALLEJO, S.I. y N.E. GONZÁLEZ (eds). *Biodiversidad Marina y Costera de México*. Com. Nal. Biodiversidad y CIQRO, México, 865 pp.
- JIMÉNEZ-ILLESCAS, A. R., 1996. Análisis de procesos barotrópicos y baroclínicos en la Bahía de La Paz, B.C.S. Tesis Doctoral. UNAM, México. 193 pp.
- KIEFER, D. A., N. S. CHAMBERLIN y C. R. BOOTH, 1989. Natural fluorescence of chlorophylla: Relationship to photosynthesis and chlorophyll concentration in the western south Pacific gyre. *Limnology and Oceanography* 35(5):808-884.
- LAVANIEGOS, E. B. y D. LÓPEZ-CORTÉS, 1997. Fatty acid composition and community structure of plankton from the San Lorenzo Channel, Gulf of California. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 45: 845-854.
- LECHUGA-DEVÉZE, C. H., J. GARCÍA-PÁMANES y J. BUSTILLOS-GUZMÁN, 1986. Condiciones ecológicas de una laguna costera de la costa oeste del golfo de California, turbiedad y clorofila a. *Ciencias Marinas* 12(1):19-31.
- LÓPEZ-VERDIN, C. 1999. Variabilidad de la productividad orgánica primaria en el Golfo de California. Tesis de Licenciatura, Departamento de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad de Sonora. México. 83 pp.
- MARTÍNEZ-LÓPEZ, A., R. CERVANTES-DUARTE, A. REYES-SALINAS y J. E. VALDEZ-HOLGUÍN, 2001. Cambio estacional de clorofila a en la Bahía de la Paz, B.C.S., México. *Hidrobiologica* 11 (1): 45-52.
- REYES-SALINAS A. y R. CERVANTES-DUARTE, 1998. Masas de Agua en la Bahía de La Paz, B.C.S. Boletín No. 66 CICIMAR-IPN, México.
- REYES-SALINAS, A., 1999. Factores que controlan la productividad primaria en la Bahía de la Paz, B.C.S. Tesis de maestría. CICIMAR-IPN, México. 122 pp.
- ROBLES GIL-MESTRE, S., 1998. El clima de la ciudad de La Paz, B.C.S. Tesis de Maestría. UNAM, México. 233 pp.
- SANTOYO-REYES, H., 1994. Fitoplancton y productividad. In: DE LA LANZA ESPINO G. y C. CÁCERES (Eds.). *Lagunas Costeras y el Litoral Mexicano*. México. 525 p.
- SIMPSON, J. H., C. M. ALLEN y N. C. G. MORRIS, 1978. Shelf sea fronts adjustment revealed by satellite IR imagery. *Nature* 280: 648-651.
- SIMPSON, J. H., D. G. HUGES y N. C. G. MORRIS, 1977. The relation of seasonal stratification to tidal mixing on the continental shelf. In: ANGEL, M. (Ed.). *A voyage to discovery. Deep Sea Research Supplement* 327-340 pp.
- SIMPSON, J. H. y J. R. HUNTER. 1974. Fronts in the Irish Sea. *Nature* 250: 404-406.
- STEGMANN, P. M., M. R. LEWIS, C. O., DAVIS y J. J. CULLEN, 1992. Primary production estimates from recording of solar-stimulated fluorescence in the equatorial Pacific at 150°W. *Journal of Geophysical Research* 97: 627-638.
- VALDEZ-HOLGUÍN J. E., G. GAXIOLA-CASTRO y R. CERVANTES-DUARTE, 1995. productividad primaria en el Golfo de California calculada a partir de la relación entre irradiancia superficial y clorofila de la zona eufórica. *Ciencias Marinas* 21(3):311-329.
- ZAYTSEV, O. V., F. SALINAS-GONZÁLEZ y S. TROYO-DIEGUEZ, 1998. Water dynamics and mixing studies in the coastal zone of the Gulf of California. Proc. Canadian Hydrographic Conference, 267-276.

Recibido: 5 de marzo de 2002.

Aceptado: 25 de noviembre de 2002.