

Efecto de la marea en la concentración de nutrientes, clorofila *a* y parámetros físicos y químicos en una laguna costera subtropical (Bahía Magdalena, México)

Tidal effect on the nutrients, chlorophyll-*a* concentration, and physical-chemical parameters in a subtropical coastal lagoon (Bahía Magdalena, Mexico)

Rafael Cervantes Duarte¹, Luisa Margarita Rodríguez Mata² y Silverio López López¹

¹ Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional., Apdo. Postal 592, La Paz, BCS., 23000. México

² Estación de Investigaciones Marinas de Margarita (EDIMAR), Final Calle Colón, Punta de Piedras estado Nueva Esparta, Venezuela

e-mail: rcervan@ipn.mx

Recibido: 02 de mayo de 2016.

Aceptado: 09 de junio de 2017.

Cervantes Duarte R., L. M. Rodríguez Mata y S. López López. 2017. Efecto de la marea en la concentración de nutrientes, clorofila *a* y parámetros físicos y químicos en una laguna costera subtropical (Bahía Magdalena, México). *Hidrobiológica* 27 (2): 253-264.

RESUMEN

Antecedentes. Bahía Magdalena es una laguna costera subtropical de alta importancia ecológica y pesquera del noroeste (NO) de México, donde se requiere consolidar el conocimiento de los procesos hidrodinámicos y la calidad de sus aguas para mejorar su aprovechamiento. **Objetivos.** Analizar la influencia de la marea en la variación y transporte de nutrientes y clorofila *a* entre la laguna y el océano adyacente como mecanismo de fertilización de la región. **Métodos.** Se realizaron tres muestreos en junio, agosto y noviembre de 2005 en un sitio aproximadamente a 5 km de la boca (24° 57' N y 112° 03' O). Se tomaron muestras cada 2 horas durante cada ciclo de marea para medir nutrientes, clorofila *a* y oxígeno a tres profundidades (0, 15 y 30 m), así como temperatura y salinidad mediante un CTD. **Resultados.** Se identificaron tres condiciones climático-oceanográficas: surgencias (junio), estratificación (agosto) y ENSO (El Niño Southern Oscillation) negativo (noviembre). La relación entre amplitud de marea y las variables medidas fue mayor en agosto ($p < 0.05$) respecto a junio y noviembre. **Conclusiones.** El transporte neto de nutrientes por ciclo de marea depende de la época del año y el estado de la marea y se considera alto comparado con otros sistemas de menores dimensiones y explica la elevada productividad orgánica en esta región costera.

Palabras clave: Estuario negativo, fosfato, nitrógeno, oxígeno, transporte neto.

ABSTRACT

Background. Magdalena Bay is a subtropical coastal lagoon of northwestern Mexico with important ecological considerations and numerous fisheries. Knowledge of hydrodynamics and water quality are essential for establishing best management practices for the Bay. **Goals.** The aim of the study was to analyze the influence of the tide on the variation and transport of nutrients and chlorophyll *a* between the inner lagoon and the adjacent ocean as a fertilization mechanism in the area. **Methods.** Samples were obtained in June, August, and November 2005 at a site close to the mouth (24° 57' N and 112° 03' W). The samples were obtained every 2 hours during each tidal cycle at three different depths (0, 15, and 30 m). Temperature and salinity were measured using a CTD. Nutrients, chlorophyll *a*, and oxygen were measured at a laboratory. **Results.** Three climatic-oceanographic conditions were identified: upwelling (June), stratification (August), and negative effects during the ENSO (November). The correlation between tidal range and other variables was significant ($p < 0.05$) in August, compared to June and November. **Conclusions.** The transport of net nutrients associated with the tidal cycle depends on the season and the state of the tide and is considered high compared to other smaller systems. This explains the high organic productivity in this coastal region.

Key words: Negative estuary, net transport, nitrogen, oxygen, phosphate.

INTRODUCCIÓN

Las lagunas costeras son importantes ecosistemas marinos por su alta producción primaria y relevancia ecológica. Algunos procesos que regulan y definen la productividad de estos sistemas son el ciclo y flujo de nutrientes, la descomposición y transformación de materia orgánica y la remoción de contaminantes (Brito *et al.*, 2012). El conocimiento de los balances de nutrientes (entradas y salidas) y otras variables hidrológicas como oxígeno disuelto, clorofila *a*, entre otras, en los cuerpos de agua lagunares, permiten hacer inferencias acerca de su biota y su estado trófico. Existen diferentes aproximaciones para estimar los flujos de material disuelto y particulado en los sistemas marinos costeros (De la Lanza-Espino & Rodríguez-Mena 1993; Gordon *et al.*, 1996; Alcántara *et al.*, 2012). Las lagunas costeras del oeste de la península de Baja California (México) presentan una variedad de ambientes geomorfológicos (Lankford 1977) y procesos oceanográficos, como la actividad de surgencias, que contribuyen a realizar un estudio comparativo (Zaytsev *et al.*, 2003). Debido a su ubicación, su importancia para la economía regional y su estatus de sitio Ramsar, Bahía Magdalena (BM) ha sido objeto de varias investigaciones ecológicas (Funes-Rodríguez *et al.*, 2007) e interdisciplinarias (Bizarro 2008). La calidad del agua de la laguna ha sido estudiada desde varios puntos de vista, incluyendo la dinámica de nutrientes (Álvarez-Borrego *et al.*, 1975; Cervantes-Duarte *et al.*, 2007, 2010, 2013). En este sistema antiestuarino se han realizado modelaciones numéricas y trabajo de campo para determinar el patrón de circulación e intercambio de agua entre la laguna y el mar adyacente (Morales-Zárate *et al.*, 2006; Sánchez-Montante *et al.*, 2007; Zaitsev *et al.*, 2007). Estos estudios mostraron que las aguas subsuperficiales oceánicas, relativamente frías y ricas en nutrientes, se presentan en la vecindad inmediata de la boca de BM y son susceptibles de ser transportadas hacia el interior del sistema por la acción de mareas (Cervantes-Duarte *et al.*, 2012). En consecuencia, las concentraciones de nutrientes en la laguna dependen en gran medida de la calidad de las aguas costeras adyacentes. Hasta ahora los estudios sobre la importancia del intercambio de agua entre la laguna y el mar (Acosta-Ruiz & Lara-Lara, 1978; Guerrero *et al.*, 1988; Robinson *et al.*, 2007) no han estimado el transporte de nutrientes y clorofila *a* como una medida del proceso responsable de la productividad. De acuerdo con los antecedentes oceanográficos en esta región, suponemos que los nutrientes aportados por el océano durante los procesos de surgencia y transportados por las corrientes de marea, fertilizan la laguna aumentando la biomasa fitoplanctónica. Con el propósito de analizar el efecto de la marea sobre la distribución de variables hidrológicas y calcular los flujos y el transporte de nutrientes y clorofila *a* en Bahía Magdalena y el océano adyacente, se realizaron 3 campañas de 24 horas cada una, en un sitio cercano a la boca principal en junio, agosto y noviembre del 2005.

MATERIALES Y MÉTODOS

Bahía Magdalena está localizada en el suroeste de la península de Baja California (24° 30' - 24° 48' N y 111° 51' - 112° 09' O), es el cuerpo de agua costero más extenso y más profundo de la región y forma parte de un complejo sistema lagunar (Funes-Rodríguez *et al.*, 2007). Tiene un área de aproximadamente 565 km² con un volumen total de agua (marea baja-alta) de 6.8 a 8.1 km³. Las mareas son mixtas semidiurnas la mayor parte del año y su rango varía de 0.7 a 2.3 m (micromareal) (Hayes 1975). La zona interna es (< 10 m) y ocupa alrededor de la mitad de la superficie de la laguna, mientras que la zona más profunda

se comunica con el océano a través de una boca de 5.6 km de ancho y 38 m de profundidad (Fig. 1). Durante el año 2005 se realizaron 3 campañas en diferentes épocas del año (2 días de duración): 29-30 de junio (principios de verano boreal), 17-18 de agosto (verano) y 14-15 de noviembre (otoño), a bordo de la embarcación CICIMAR XX en un sitio ubicado a 3 km al noroeste de la parte central de la boca de Bahía Magdalena (24° 57' N y 112° 03' O) (Fig. 1). El propósito de estos muestreos fue determinar las características del agua, del océano y la laguna que se intercambian por ciclo de marea. Cada muestreo se efectuó cada 2 h y durante un lapso de 24 h. Se realizaron lances verticales de CTD Seabird 19Plus para medir la temperatura (°C) y salinidad (adimensional) en la columna de agua. Cabe destacar que además se tomaron muestras discretas de agua para calcular el oxígeno disuelto (OD), nutrientes (nitrato, nitrito, amonio y fosfato) y clorofila *a*, a profundidades de 0, 15 y 30 m con una botella Niskin, General Oceanic de 5 L. Las muestras para OD fueron colectadas y fijadas en botellas de vidrio de 125 ml, y transportadas en una caja oscura hasta su análisis al día siguiente del muestreo en el laboratorio. Las submuestras para la determinación de sales nutrientes y clorofila *a* (aproximadamente 1.5 L) fueron tomadas de la botella Niskin y refrigeradas a 4 °C hasta ser filtradas en el laboratorio. Cerca de 12 horas después de su colecta, las muestras para clorofila *a* (1 L) fueron procesadas con filtros Whatman GFF de 25 mm de diámetro. El contenido del filtro fue utilizado para extraer la clorofila *a* de acuerdo con el procedimiento de Venrick y Hayward (1984) y luego cuantificar la concentración con el método de Jeffrey & Humphrey (1975) con ayuda de un espectrofotómetro (Spectronic Genesys-2). El filtrado de cada muestra (aproximadamente 100 ml por analito) fue almacenado en un congelador a -50 °C para los análisis de amonio, nitrato, nitrito y fosfato, con base en los métodos de Strickland y Parsons (1972). En este estudio se consideró el nitrógeno inorgánico disuelto (NID) como la suma de nitrito, nitrato y amonio. Las unidades e intervalo de detección para cada variable fueron los siguientes: clorofila *a* (0.1 - 10 mg m⁻³); nitrito (0.01 - 2.5 µM); nitrato (0.05 - 25 µM); amonio (0.04 - 5 µM); fosfato (0.03 - 2.5 µM) y oxígeno disuelto (0.07 - 7.0 ml l⁻¹). Los datos de la amplitud de la marea (pronósticos respecto al NMM) y viento (dirección en grados y velocidad en metros por segundo) fueron obtenidos de las páginas: <http://predmar.cicese.mx/programa/> y <http://meteorologia.semarn.gob.mx/>, respectivamente. La ubicación de las estaciones del mareógrafo y anemómetro se indican en la Figura 1. Para determinar si existían diferencias significativas entre las variables medidas en las tres profundidades seleccionadas (0, 15 y 30 m) durante el ciclo de 24 horas, y considerando los supuestos de normalidad (prueba de Levene), se realizó un análisis de varianza de una vía (ANOVA) y una prueba *a posteriori* de comparaciones múltiples por pares de Tukey HSD (Honestly-Significant-Difference), con un nivel de confianza de 95%. Asimismo, se llevaron a cabo pruebas de asociación y relación entre la concentración de clorofila *a* como indicador de la biomasa fitoplanctónica y el resto de las variables medidas. El transporte de volumen de agua transversal a la boca (gasto) integrado en la vertical y a lo largo de la sección longitudinal (172 x 10³ m³ s⁻¹ en flujo y en 162 x 10³ m³ s⁻¹ en reflujo), fue estimado a partir de mediciones *in situ* y modeladas con el modelo numérico de circulación costera (ECOM, por sus siglas en inglés) (Sánchez-Montante *et al.*, 2007).

RESULTADOS

El 29 y 30 junio de 2005 la marea tuvo una amplitud de 1.01 m y el viento dominante fue del noreste (NE) (73%), con una velocidad prome-

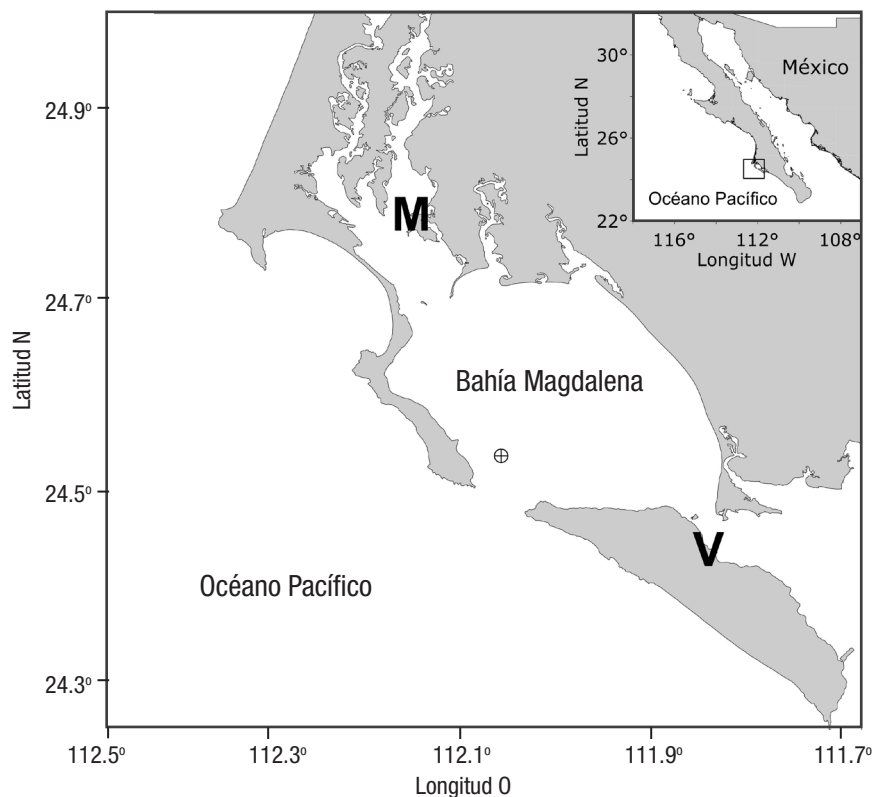
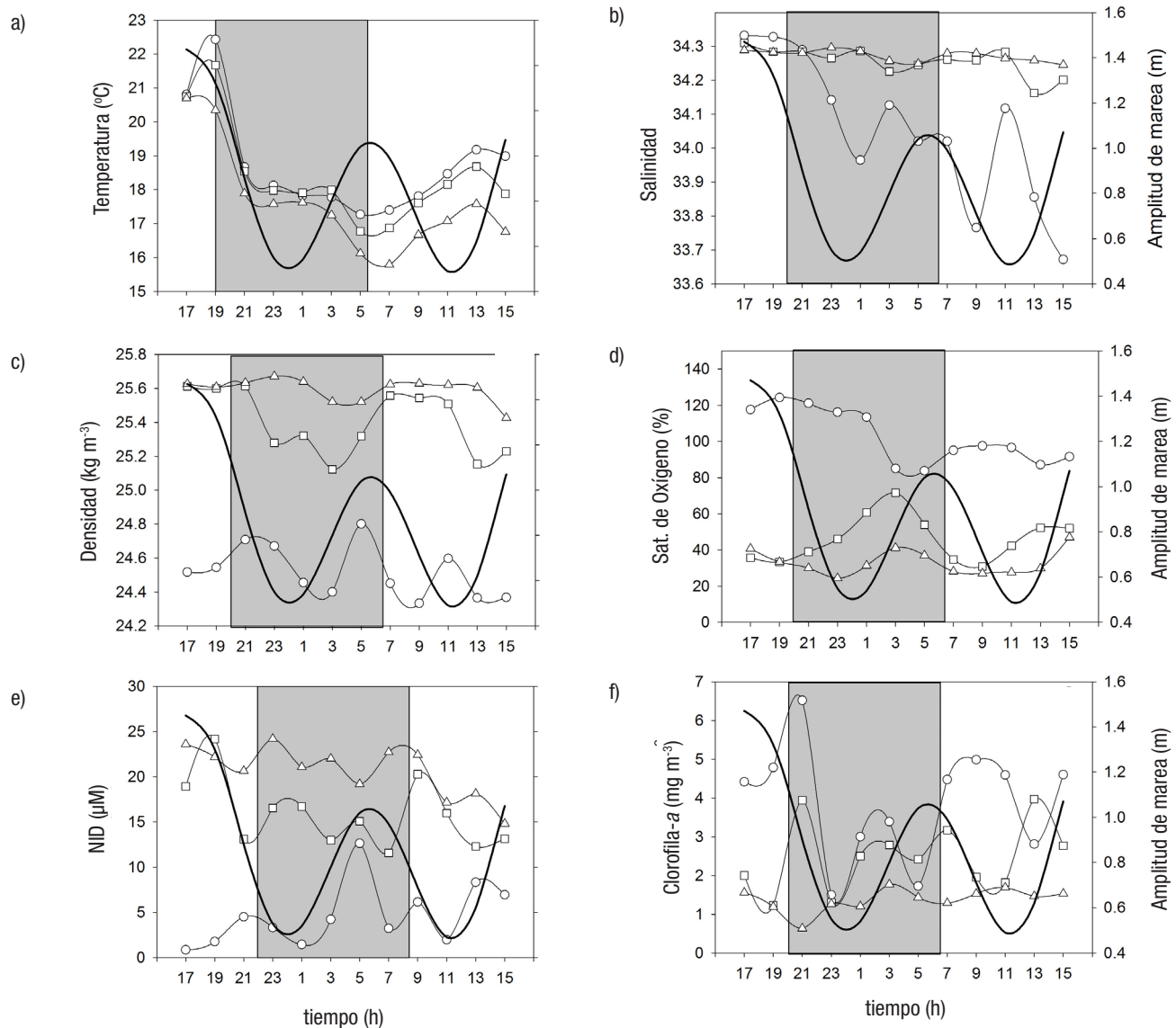


Figura 1. Localización del sitio de estudio (boca de Bahía Magdalena, B. C. S., México) (Θ); mareógrafo (M), estación meteorológica (V).

dio de $2.2 \pm 0.8 \text{ m s}^{-1}$. La temperatura en la columna de agua (0, 15 y 30 m) presentó los valores más altos en superficie ($18.7 \pm 1.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$) y los menores en el fondo ($17.6 \pm 1.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$), con una diferencia de hasta $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ entre ambas profundidades. El valor máximo se registró a las 19 h ($22.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a 0 m) y el mínimo a las 07 h ($15.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a 30 m) (Fig. 2a). Los datos no cumplieron el criterio de normalidad (Tabla 1) y la relación con la altura de la marea fue significativa (Tabla 2). La salinidad superficial (34.0 ± 0.2) fue significativamente menor que a 15 y 30 m (34.3 ± 0.0) (Tabla 1), excepto al inicio del muestreo de las 17 a las 21 h (Fig. 2b). La relación con la altura de marea no fue significativa. La densidad de la columna de agua varió entre un mínimo de 24.3 kg m^{-3} en superficie a un máximo de 25.4 kg m^{-3} a 30 m de profundidad (Fig. 2c). Se registraron diferencias significativas entre las profundidades (0, 15 y 30 m) y no se observó relación significativa con la amplitud de la marea (Tabla 2). La saturación de oxígeno (%) durante el muestreo obtuvo valores por arriba de la saturación en la superficie (84-124%) y disminuyeron significativamente a los 15 m (31-72%) y 30 m (24-47%) (Tabla 1 y Fig. 2d). Sólo a una profundidad de 30 m se relacionó significativamente con la amplitud de la marea (Tabla 2). Durante el ciclo de muestreo, los nutrientes (NID y fosfato) mostraron el mismo patrón de distribución y su relación fue alta y significativa ($r = 0.90$; $p < 0.001$); ambos incrementaron su concentración de la superficie al fondo (Tabla 1; Fig. 2e) y no se relacionaron de forma significativa con la altura de marea (Tabla 2). La clorofila *a* disminuyó significativamente de la superficie ($3.7 \pm 1.2 \text{ mg m}^{-3}$) al fondo (2.3 ± 0.8 a 15 m y $1.4 \pm 0.2 \text{ mg m}^{-3}$ a 30 m) (Tabla 1 y Fig. 2f). La relación con la amplitud de la marea no fue significativa en ninguna de las profundidades (Tabla 2).

El 17 y 18 de agosto la marea tuvo una amplitud de 2.3 m y el viento dominante fue del suroeste (SO) (55%), con una velocidad de $3.1 \pm 0.4 \text{ m s}^{-1}$. La temperatura en la columna de agua varió durante el ciclo de un máximo superficial de $24.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a las 14 h, a un mínimo de $18.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a 30 m de profundidad a las 24 h (Tabla 1, Fig. 3a). La temperatura superficial fue significativamente mayor que a los 15 y 30 m de profundidad. Las relaciones entre la temperatura y la amplitud de la marea no fueron significativas (Tabla 2). La salinidad, en las tres profundidades, desarrolló un patrón similar de variación, las mayores diferencias se observaron en la superficie, con un mínimo de 34.0 a las 06:00 h y un máximo de 34.4 a las 18:00 h (Fig. 3b). La relación con la altura de la marea fue negativa y no significativa (Tabla 2). Durante el ciclo, la densidad aumentó de la superficie al fondo, con un mínimo de 22.4 kg m^{-3} a las 14 h, a un máximo de 24.7 kg m^{-3} , a las 24:00 h (Fig. 3c). La densidad superficial fue significativamente menor a 15 y 30 m y la correlación con la altura de la marea en ninguno de los casos fue significativa. La saturación de oxígeno (%) fue alta en la superficie (94-129%) y mínima a 30 m (48-89%). Únicamente a 30 m se registró una relación significativa con la amplitud de la marea (Tabla 2). El NID y fosfato manifestaron el mismo patrón de variación en el ciclo con un incremento de la superficie al fondo (Fig. 3d; Tabla 1). La relación entre ambos nutrientes fue alta y significativa ($r = 0.84$; $p < 0.001$). El NID presentó diferencias significativas entre las profundidades (0, 15 y 30 m) y la relación con la altura de la marea no fue significativa. La clorofila *a* en la columna de agua obtuvo un máximo a 15 m ($3.1 \pm 0.9 \text{ mg m}^{-3}$) respecto a la superficie ($2.1 \pm 0.6 \text{ mg m}^{-3}$) y a 30 m ($2.2 \pm 0.8 \text{ mg m}^{-3}$). La relación con la amplitud de la marea fue significativa a 0 y 30 m (Tabla 2).



Figuras 2a-f. Distribución de las variables medidas en la boca de Bahía Magdalena, México, en junio, a 0 (O), 15 (□) y 30 m (Δ). a) temperatura, b) salinidad, c) densidad, d) oxígeno, e) nutrientes, f) clorofila (Cl-a).

El 14 y 15 de noviembre el viento dominante fue del sur-sureste (SSE) (78%), con una velocidad promedio de $2.3 \pm 1.0 \text{ m s}^{-1}$ y una amplitud de marea de 2.4 m. La temperatura en la columna de agua tuvo el valor más alto en la superficie (20.7°C) a las 16 h y el mínimo (16.3°C) a las 18 h (Fig. 4a). En promedio, la temperatura disminuyó de la superficie ($19.9 \pm 0.5^\circ\text{C}$) al fondo (17.7 ± 0.8 a 15 m y $16.9 \pm 0.5^\circ\text{C}$ a 30 m). La relación con la amplitud de marea no fue significativa (Tabla 2). La salinidad manifestó una desviación estándar de 0.09 en la superficie en el ciclo y en promedio aumentó de 33.6 (en superficie) a 33.7 (a 30 m) (Tabla 1; Fig. 4b). La salinidad a 30 m fue significativamente mayor que la calculada a 0 y 15 m (Tabla 1), y se relacionó con la amplitud de marea (Tabla 2). La densidad promedio se incrementó de la superficie al fondo (23.7 ± 0.1 ; 24.3 ± 0.2 y $24.5 \pm 0.1 \text{ kg m}^{-3}$) (Tabla 1; Fig. 4c). No se relacionó de forma significativa con la amplitud de la

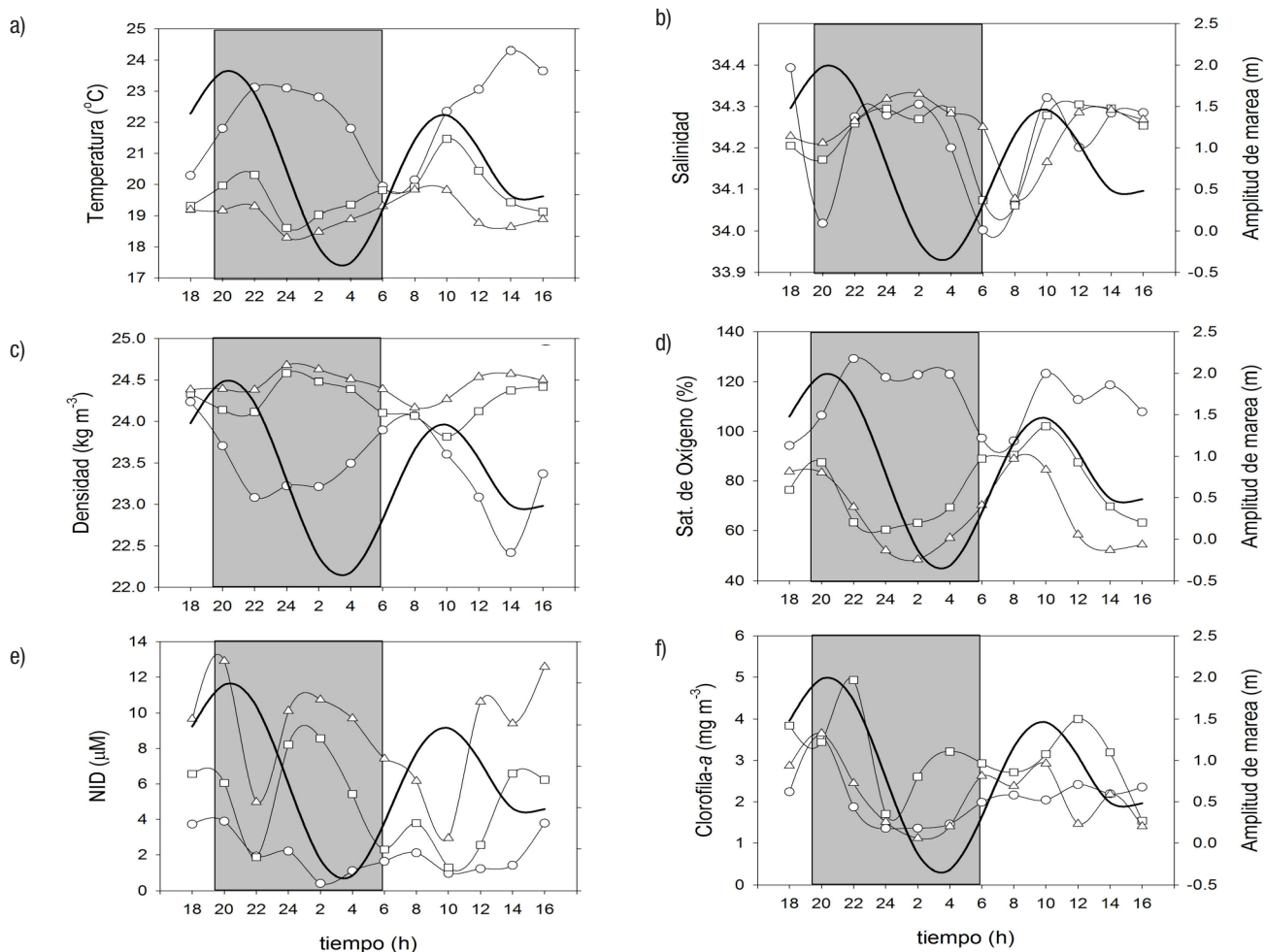
marea (Tabla 2). La saturación de oxígeno disminuyó de la superficie ($95 \pm 5\%$) al fondo (88 ± 7 a 15 m y $79 \pm 5\%$ a 30 m) (Tabla 1; Fig. 4d). No hubo un vínculo significativo con la amplitud de marea (Tabla 2). Los nutrientes (NID y fósforo) se acrecentaron de la superficie al fondo durante el muestreo (Tabla 1; Fig. 4e) y se relacionaron positiva y significativamente ($r = 0.83$; $p < 0.001$). Se pudieron observar en el NID diferencias significativas entre las tres profundidades (Tabla 1) y la concentración a 30 m se relacionó de manera significativa con la amplitud de marea, tanto para NID como fósforo (Tabla 2). La clorofila *a* aumentó de la superficie ($1.2 \pm 0.4 \text{ mg m}^{-3}$) al fondo (1.6 ± 0.4 a 15 m y $2.2 \pm 0.7 \text{ mg m}^{-3}$ a 30 m) (Tabla 1; Fig. 4e). La concentración a 30 m fue mayor que a 0 y 15 m y no se relacionó de modo significativo con la amplitud de marea (Tabla 2).

Tabla 1. Valores promedio y desviación estándar por ciclo de 24 horas en la boca de Bahía Magdalena, B.C.S., México (en negritas se indican diferencias significativas entre profundidades ($p < 0.05$)).

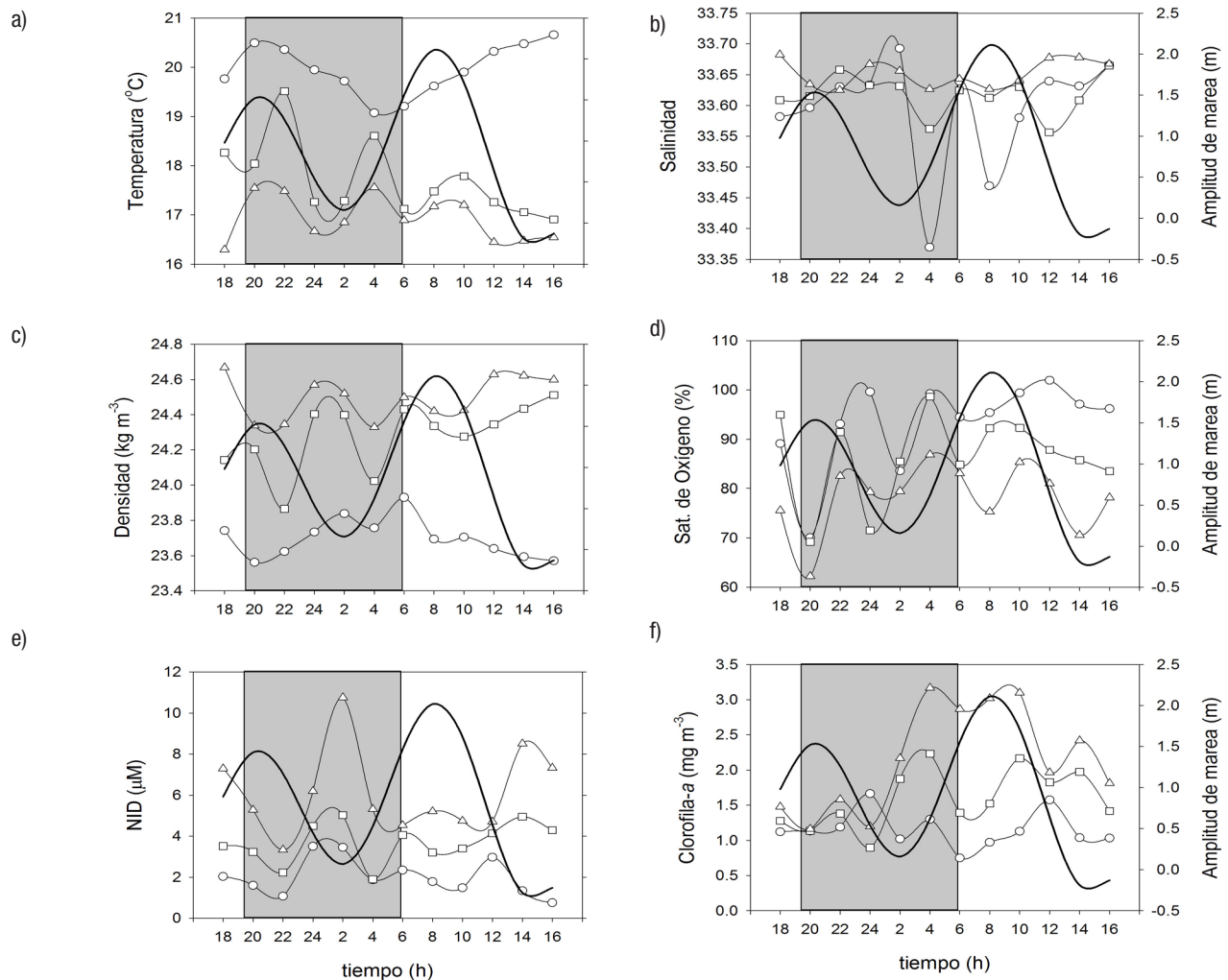
			ANOVA (una vía)			Tukey (HDS)		Levene
		Prof.	media \pm d.s	F (2,33)	p	M.S.	p	p
Temperatura (°C)	Junio	0	18.7 (1.5)	1.73	0.19	2.14	0.39	0.99
		15	18.4 (1.4)				0.88	
		30	17.6 (1.5)				0.19	
	Agosto	0	21.6 (1.2)	34.39	<0.05	0.96	0.22	<0.05
		15	19.7 (1.8)				<0.05	
		30	19.2 (0.6)				<0.05	
	Noviembre	0	19.9 (0.5)	83.92	<0.05	0.35	<0.05	0.21
		15	17.7 (0.8)				<0.05	
		30	16.9 (0.5)				<0.05	
Salinidad	Junio	0	34.0 (0.2)	11.25	<0.05	0.16	0.95	<0.05
		15	34.3 (0.0)				<0.05	
		30	34.3 (0.0)				<0.05	
	Agosto	0	34.2 (0.1)	0.27	0.76	0.01	0.89	0.09
		15	34.2 (0.1)				0.96	
		30	34.2 (0.1)				0.75	
	Noviembre	0	33.6 (0.1)	3.18	0.05	0	0.59	<0.05
		15	33.6 (0.0)				0.30	
		30	33.7 (0.0)				<0.05	
Densidad (Kg m ⁻³)	Junio	0	24.5 (0.1)	190.10	<0.05	0.02	<0.05	<0.05
		15	25.4 (0.2)				<0.05	
		30	25.6 (0.1)				<0.05	
	Agosto	0	23.4 (0.5)	31.58	<0.05	0.11	0.29	<0.05
		15	24.2 (0.2)				<0.05	
		30	24.4 (0.1)				<0.05	
	Noviembre	0	23.7 (0.1)	96.10	<0.05	0.02	<0.05	<0.05
		15	24.3 (0.2)				<0.05	
		30	24.5 (0.1)				<0.05	
Saturación de Oxígeno (%)	Junio	0	102 (15)	114.53	<0.05	142.47	<0.05	<0.05
		15	46 (12)				<0.05	
		30	33 (7)				<0.05	
	Agosto	0	113 (12)	37.09	<0.05	188.04	0.19	0.50
		15	77 (14)				<0.05	
		30	67 (15)				<0.05	
	Noviembre	0	95 (5)	10.02	<0.05	67.34	0.05	0.76
		15	88 (7)				0.12	
		30	79 (5)				<0.05	
NID (μM)	Junio	0	4.6 (3.4)	72.51	<0.05	11.24	<0.05	0.74
		15	15.9 (3.7)				<0.05	
		30	20.4 (2.8)				<0.05	
	Agosto	0	2.0 (1.2)	25.84	<0.05	5.56	<0.05	<0.05
		15	5.0 (2.5)				<0.05	
		30	8.9 (3.0)				<0.05	
	Noviembre	0	2.0 (0.9)	25.31	<0.05	1.99	<0.05	<0.05
		15	3.7 (1.0)				<0.05	
		30	6.1 (2.1)				<0.05	
Fosfato (μM)	Junio	0	0.9 (0.3)	67.55	<0.05	0.09	<0.05	0.41
		15	2.0 (0.3)				<0.05	
		30	2.3 (0.2)				<0.05	

Tabla 1. (Continuación).

	Prof.	ANOVA (una vía)			Tukey (HDS)		Levene
		media \pm d.s	F (2,33)	p	M.S.	p	p
Clorofila <i>a</i> (mg m ⁻³)	Agosto	0	24.80	<0.05	0.11	0.06	0.34
		15					
		30					
	Noviembre	0	22.18	<0.05	0.01	<0.05	0.91
		15					
		30					
	Junio	0	19.15	<0.05	1.00	<0.05	<0.05
		15					
		30					
	Agosto	0	6.27	<0.05	0.62	<0.05	0.34
		15					
		30					
	Noviembre	0	11.44	<0.05	0.26	<0.05	<0.05
		15					
		30					



Figuras 3a-f. Distribución de las variables medidas en la boca de Bahía Magdalena, México en agosto, a 0 (O), 15 (□) y 30 m (Δ). a) temperatura, b) salinidad, c) densidad, d) oxígeno, e) nutrientes, f) clorofila (Cl-a).



Figuras 4a-f. Distribución de las variables medidas en la boca de Bahía Magdalena, México, en noviembre, a 0 (O), 15 (□) y 30 m (Δ). a) temperatura, b) salinidad, c) densidad, d) oxígeno, e) nutrientes, f) clorofila (Cl-a).

DISCUSIÓN

Durante el año 2005 se identificaron en el sitio de estudio tres diferentes condiciones climático-oceanográficas. La primera se registró en junio (principios de verano) con la influencia del viento dominante del NO cuando se observó agua más fría y con mayor clorofila *a* en la zona de la boca y exterior de la laguna (Fig. 5a y 5b) debido a las surgencias costeras, las cuales ocurren con mayor intensidad de marzo a junio (Zaytsev *et al.*, 2003; Cervantes *et al.*, 2012; Cervantes *et al.*, 2013). La columna de agua se caracterizó por tener en promedio la menor temperatura ($<18^{\circ}\text{C}$) y mayor densidad (hasta 25.59 kg m^{-3} a 30 m de profundidad), así como los más altos nutrientes (hasta $20.4\text{ }\mu\text{M}$ de NID y $2.3\text{ }\mu\text{M}$ de fosfato a 30 m de profundidad) y clorofila *a* (3.7 mg m^{-3} en superficie) durante el periodo de estudio. La temperatura y la amplitud de la marea se relacionaron positiva y significativamente ($r = 0.6$; $p < 0.05$), lo que indica que durante este ciclo de marea, especialmente en su máxima amplitud, la salida de agua fue más cálida durante el refluo (Fig. 2a). La biomasa de fitoplancton (medida por la clorofila *a*) reveló

una relación positiva y significativa con la saturación de oxígeno ($r = 0.73$), posiblemente como resultado de la fotosíntesis del fitoplancton, con valores arriba del 100% de saturación cuando la clorofila *a* fue máxima y disminuyeron ambas variables con el incremento de la profundidad. En agosto (verano) ocurrió una estratificación en los primeros 10 metros de la columna de agua debido al aumento de temperatura. Esta época es la más cálida y oligotrófica del año (Fig. 5c y 5d). El viento dominante típicamente proviene del SSE con velocidad casi siempre menor ($3.1 \pm 0.4\text{ m s}^{-1}$ en este estudio) a la observada cuando la dirección es NO (promedio 5 y hasta 15 m s^{-1}), excepto en temporada de tormentas tropicales (García-Escobar, 1992). En este mes, bajo las condiciones de una mayor amplitud de la marea, se registró el mayor número de relaciones significativas (y de signo contrario) con los nutrientes y positivo con la clorofila *a*. La temperatura presentó una relación inversa y significativa con los nutrientes ($\text{DIN} = -0.74$ y fosfato $= -0.87$), es decir, que el agua superficial más cálida fue pobre en nutrientes, resultado de su utilización y por la estratificación térmica que evita el transporte desde el fondo. La relación de temperatura con la saturación

de oxígeno fue positiva ($r = 0.90$), posiblemente debido a la producción de oxígeno del fitoplancton, el cual tuvo un máximo de clorofila *a* a 15 m de profundidad. La imagen de clorofila *a* (Fig. 5d) mostró una distribución homogénea en la región con valores alrededor de 2 mg m^{-3} , consistentes con los registrados *in situ* ($2.1 \pm 0.6 \text{ mg m}^{-3}$). La relación de la clorofila *a* con el resto de las variables fue baja y no significativa, excepto con la amplitud de la marea ($r = 0.51$) de manera similar a lo reportado por Acosta-Ruiz y Lara-Lara (1978), quienes sugieren que Bahía Magdalena aporta altas biomásas de fitoplancton (clorofila *a*) al océano abierto durante el reflujo. La tercera condición tuvo lugar en noviembre (otoño) donde la salinidad fue la menor del estudio (< 34), y que junto con la temperatura ($< 21 \text{ }^{\circ}\text{C}$) (Fig. 5e) corresponde con la del agua de la Corriente de California (Durazo & Baumgartner, 2002; Durazo, 2015), que generalmente es más rápida en invierno-primavera (0.15 a 0.20 m s^{-1} en primavera), pero que debido a un enfriamiento regional pudo haber favorecido su flujo al sur en esta época del año, como lo indica el cambio de signo del índice multivariado El Niño Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés) con un incremento de la corriente al sur (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/ens/mei>) (Fig. 6). Las relaciones con la amplitud de la marea generalmente fueron negativas (Tabla 2), lo cual evidencia el contraste entre las condiciones ambientales de flujo y reflujo en la laguna durante un ciclo de marea. Excepto la amplitud de la marea, el resto de las variables presentaron relaciones significativas entre ellas. La temperatura se relacionó inversa y significativamente con la densidad ($r = -0.99$) y los nutrientes ($r = -0.79$ y -0.74 para NID y fosfato respectivamente), lo que indica que aguas más frías son más densas y con mayor concentración de nutrientes y

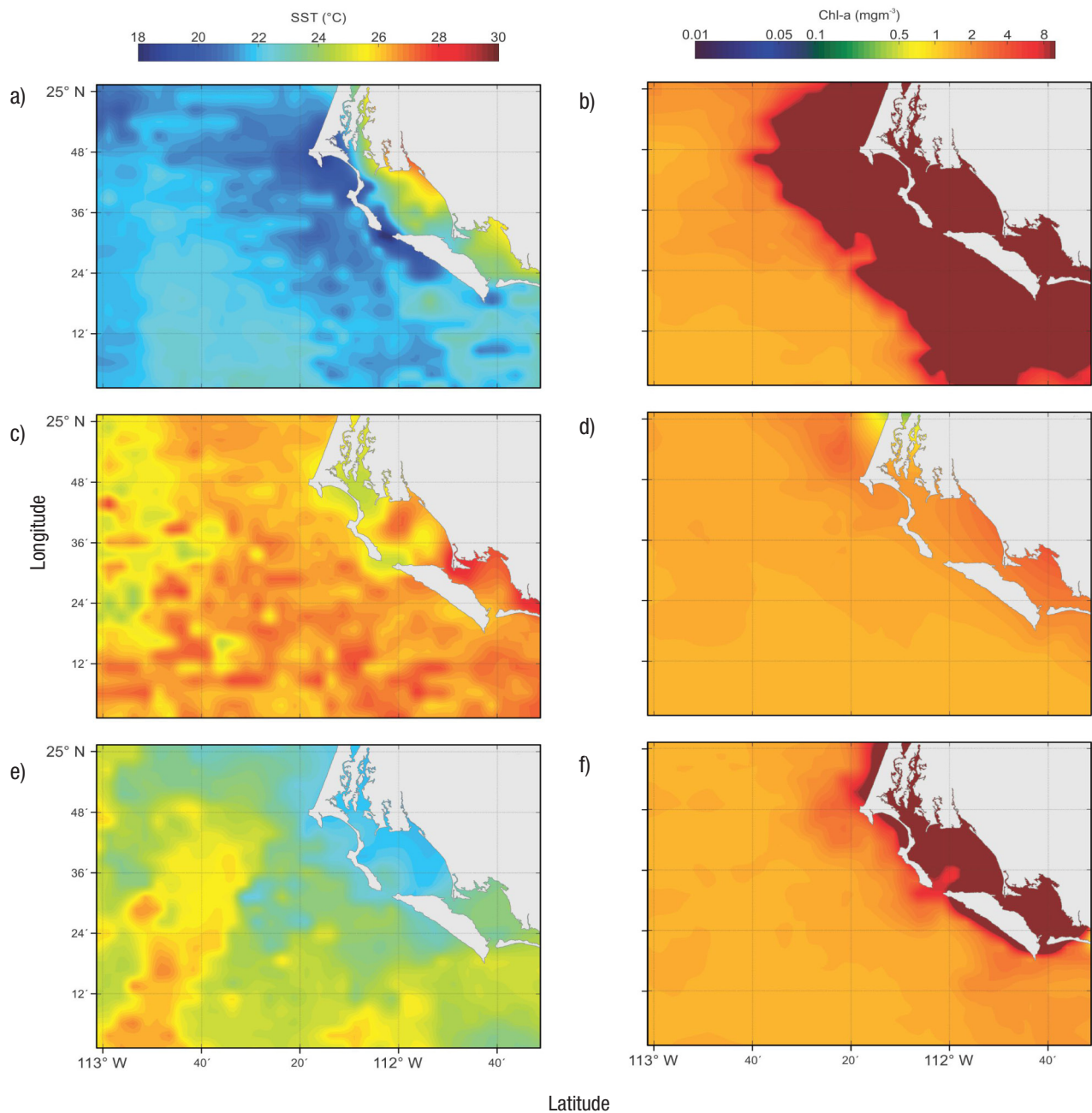
viceversa. La clorofila *a* se relacionó positivamente con los nutrientes ($r = 0.47$ y 0.40 para NID y fosfato respectivamente), esto es, la correlación entre la mayor disponibilidad con la mayor biomasa fitoplanctónica (Barber & Hiscock, 2006). En este ciclo la clorofila *a* promedio a 30 m fue significativamente mayor que a 0 y 15 m, es decir, que la distribución de clorofila no es homogénea en la columna de agua; su distribución espacial mostró mayor concentración dentro de la laguna posiblemente como resultado del aporte de nutrientes remineralizados (Fig. 5f) (Cervantes-Duarte *et al.*, 2012).

En promedio, la saturación de oxígeno disminuyó de $\approx 100 \%$ en la superficie al fondo (33% en junio, 67% en agosto y 79% en noviembre). Los valores mínimos registrados en junio es posible que se deban al origen subsuperficial del agua (aproximadamente 80 m) transportada hacia la superficie por el proceso de surgencia costera (Cervantes-Duarte *et al.*, 2013; Zaitsev *et al.*, 2014). En verano y otoño (agosto y noviembre) los valores de oxígeno debajo de la superficie tienden a disminuir de manera normal por el aumento de temperatura en el año y el aumento en la tasa de respiración de los organismos.

Los nutrientes se incrementaron en general de la superficie al fondo y su concentración fue mayor en junio, esto asociado al abasto por surgencias. El proceso antes mencionado funciona como un sistema de fertilización que incrementa la biomasa de clorofila *a* en la región. En agosto y noviembre una menor disponibilidad de nutrientes produjo una disminución relativa de la clorofila *a* en la superficie, con máximos significativos a 15 y 30 m en agosto y noviembre, respectivamente, y de forma regular están relacionados con los procesos de estratificación en la columna de agua (Murillo-Murillo *et al.*, 2013).

Tabla 2. Coeficiente de correlación de Pearson (r) y valor de significancia p de la amplitud de la marea y la variable medida durante el ciclo de 24 h (boca de bahía Magdalena, B. C. S., México, 2005). En negritas se indican las pruebas significativas.

	Prof.	Junio		Agosto		Noviembre	
		r	p	r	p	r	p
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	0	0.62	< 0.05	0.13	0.68	-0.34	0.28
	15	0.56	< 0.05	0.53	0.07	0.34	0.27
	30	0.55	0.06	0.51	0.09	0.54	0.07
Salinidad	0	0.38	0.23	-0.05	0.86	-0.36	0.24
	15	0.24	0.44	-0.18	0.56	-0.01	0.98
	30	-0.01	0.99	-0.51	0.09	-0.64	< 0.05
Densidad (Kg m^{-3})	0	0.05	0.88	0.26	0.42	0.19	0.56
	15	0.32	0.31	-0.56	0.06	-0.34	0.28
	30	-0.28	0.37	-0.53	0.07	-0.55	0.06
Sat.Oxígeno (%)	0	0.25	0.43	-0.18	0.57	-0.17	0.59
	15	0.36	0.26	0.41	0.18	0.12	0.71
	30	0.59	< 0.05	0.72	< 0.05	0.01	0.96
NID (μM)	0	-0.05	0.88	0.50	0.09	-0.12	0.72
	15	0.32	0.31	-0.37	0.23	-0.53	0.08
	30	0.16	0.61	-0.26	0.42	-0.68	< 0.05
Fosfato (μM)	0	-0.25	0.43	0.25	0.44	0.21	0.51
	15	0.47	0.12	-0.61	< 0.05	-0.49	0.10
	30	-0.37	0.23	-0.57	< 0.05	-0.61	< 0.05
Clorofila- <i>a</i> (mg m^{-3})	0	0.31	0.33	0.64	< 0.05	-0.24	0.46
	15	-0.12	0.72	0.48	0.11	-0.16	0.61
	30	-0.07	0.84	0.76	< 0.05	0.26	0.42



Figuras 5a-f. Imágenes de temperatura (°C) y clorofila *a* (mg m⁻³) en la región de Bahía Magdalena, México, composiciones promedio de ocho días (incluidos los días de muestreo), resolución de 4 km, plataforma MODIS-Aqua. a- b) junio, c-d) agosto, e-f) noviembre de 2005.

Para obtener una primera aproximación del transporte neto de nutrientes a través de la boca en mareas vivas, se utilizó el volumen máximo esperado en flujo y en reflujo (Sánchez-Montante *et al.*, 2007) y el sentido de la marea fue determinado por la amplitud de la misma como se observa en el gráfico de la anomalía de densidad a la profundidad de 30 m (Fig. 7). El transporte neto de nutrientes por ciclo de marea para junio (29-30) fue de -143 kg de NID y -4 kg de fosfato, que indican una

salida de nutrientes desde la laguna durante el reflujo, los cuales es posible que no fueron asimilados en su totalidad en la laguna debido a su alta disponibilidad. En agosto (17-18) y noviembre (14-15) los transportes fueron respectivamente de 209 y 176 kg de NID y 30 y 3 kg de fosfato. En éstos últimos, entran nutrientes hacia la laguna durante el flujo de la marea. En términos de nitrógeno, los valores son superiores a los reportados en el estero Agua Dulce Sinaloa, México, de 26.4 kg

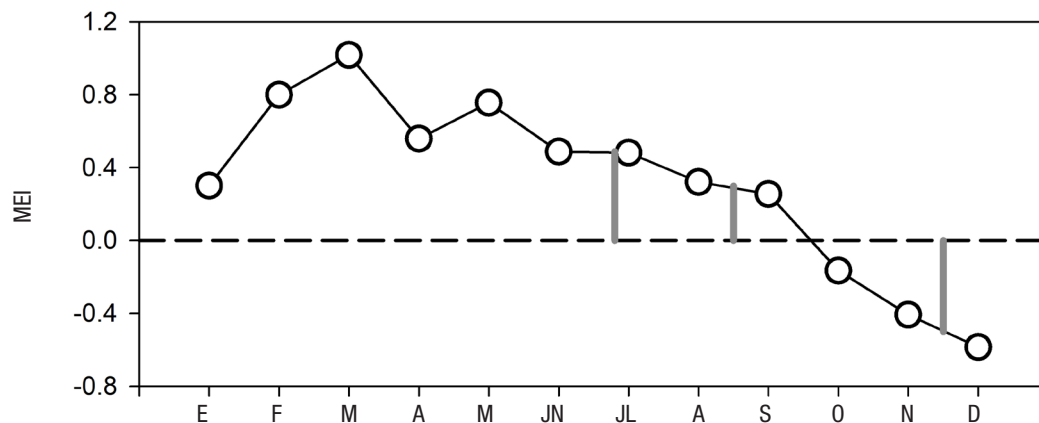


Figura 6. Variación del índice mutivariado El Niño (MEI) en el Pacífico oriental, durante los distintos meses del año 2005.

h^{-1} amonio y 18.6 kg h^{-1} nitrato durante un ciclo de marea de 6 h (De la Lanza-Espino & Rodríguez-Mena, 1993), y en la Bocana de Anca, Portugal, de 3.9 kg de nitrato + nitrito por ciclo de marea. Sin embargo, el transporte de fosfato fue más variable en este estudio que el valor de 16 kg de fosfato reportado por estos autores por ciclo de marea (Alcántara *et al.*, 2012); en ambos casos determinados en bocas pequeñas y someras con transporte de agua mucho menor, comparado con la boca de Bahía Magdalena que tiene 5.6 km ancho y 40 m de profundidad.

A diferencia de otros sistemas lagunares, la costa occidental de Baja California presenta lagunas costeras más o menos profundas con bocas amplias con un transporte de material disuelto y particulado comparativamente mayor, que ayuda a explicar su alta productividad durante el año. El metabolismo neto (autótrofo / heterótrofo) de esta laguna, evaluado por el modelo Land Ocean Interactions in the Coastal Zone (LOICZ) (Gordon *et al.*, 1996), mostró que en el periodo de febrero a julio (surgencias intensas) tiende a ser autótrofo (fotosíntesis

> respiración) y de agosto a enero (surgencias débiles) es heterótrofo (fotosíntesis < respiración) (Cervantes-Duarte, 2016). En las lagunas costeras localizadas a lo largo de la costa del noroeste de la península de Baja California, México, el océano es la fuente externa más importante de nutrientes y de carbono orgánico e inorgánico (Ribas-Ribas *et al.*, 2011), por lo que sus lagunas actúan como sumidero de nutrientes, similar a lo reportado para Bahía Magdalena, donde el NID es sumidero todo el año y el FID es fuente en el periodo de agosto a enero (Cervantes-Duarte, 2016). Los resultados en la escala diaria difieren de los reportados en la escala estacional. En principio porque los primeros consideran a la marea como la principal fuente de variación, mientras que en la escala estacional los procesos climático-oceanográficos son más relevantes. Este estudio debe considerarse como una primera aproximación del transporte diario de nutrientes y clorofila *a*, donde dependiendo de los cambios de la marea (viva y muerta) y la época del año, el balance de nutrientes definirá en gran medida la productividad del ecosistema.

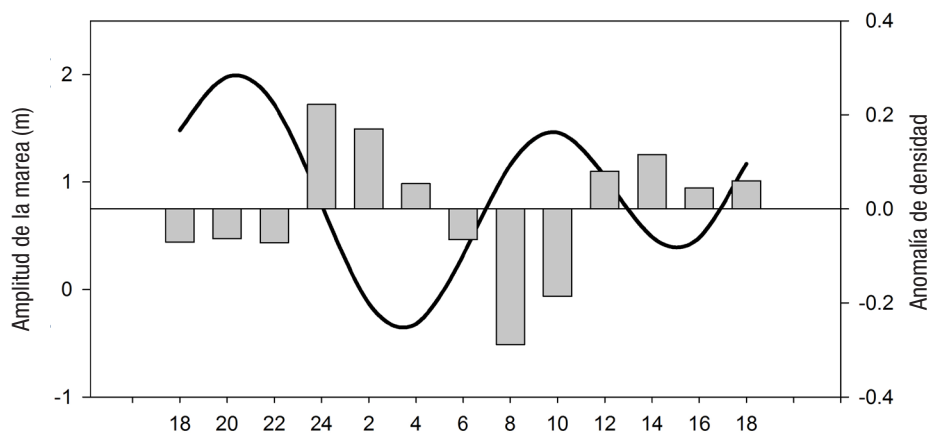


Figura 7. Variación diaria de la amplitud de marea y diferencias de densidad en la capa a 30 m medidos en la boca de Bahía Magdalena, México. Los valores positivos corresponden al reflujo y los negativos al flujo.

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Politécnico Nacional por el apoyo brindado para realizar la presente investigación.

REFERENCIAS

- ACOSTA-RUIZ, M. & J. R. LARA-LARA. 1978. Resultados físico-químicos de un estudio de variación diurna en el área central de Bahía Magdalena, BCS. *Ciencias Marinas* 5: 37-46.
- ALCÁNTARA, P., A. CRAVO & J. JACOB. 2012. Variability of nutrients and chlorophyll a in Ancão Inlet during a spring tidal cycle in April 2009. *Ciencias Marinas* 38 (1B): 161-176. DOI 10.7773/cm.v38i1B.1780
- ÁLVAREZ-BORRERO, S., L. A. GALINDO-BECT & A. CHEE-BARRAGÁN. 1975. Características hidroquímicas de Bahía Magdalena, BCS. *Ciencias Marinas* 2: 94-110.
- BARBER, R. T. & M. R. HISCOCK. 2006. A rising tide lifts all phytoplankton: Growth response of other phytoplankton taxa in diatom dominated blooms. *Global Biogeochem. Cycles*, 20, GB4S03. DOI: 10.1029/2006GB002726.
- BIZARRO, J. 2008. A review of the physical and biological characteristics of the Bahia Magdalena lagoon complex (Baja California Sur, Mexico). *Bulletin Southern California Academy of Sciences* 107 (1): 1-24.
- BRITO, A. C., A. NEWTON, P. TETT & T. F. FERNANDES. 2012. How will shallow coastal lagoons respond to climate change? A modelling investigation. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 112: 98-104. DOI: 10.1016/j.ecss.2011.09.002
- CERVANTES-DUARTE, R. 2016. Nutrient fluxes and net metabolism in a coastal lagoon SW peninsula of Baja California, Mexico. *Revista Bio Ciencias* 4 (2): 104-115. <http://editorial.uan.edu.mx/BIOCIENCIAS/article/view/174/253>
- CERVANTES-DUARTE, R., R. PREGO, S. LÓPEZ-LÓPEZ, F. AGUIRRE-BAHENA & N. OSPINA-ÁLVAREZ. 2013. Annual patterns of nutrients and chlorophyll in a subtropical coastal lagoon under the upwelling influence (SW of Baja-California Peninsula). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 120: 54-63. DOI: 10.1016/j.ecss.2013.01.020
- CERVANTES-DUARTE, R., S. LÓPEZ-LÓPEZ, F. AGUIRRE-BAHENA, E. GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ & S. FUTEMA-JIMÉNEZ. 2012. Relevancia de fuentes nitrogenadas nuevas y regeneradas en la columna de agua en Bahía Magdalena (SO Península de Baja California), México. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 47 (3): 587-592.
- CERVANTES-DUARTE, R., S. LÓPEZ-LÓPEZ, E. GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ & S. FUTEMA-JIMÉNEZ. 2010. Ciclo estacional de nutrientes, temperatura, salinidad y clorofila a en Bahía Magdalena, BCS, México (2006-2007). *CICIMAR Océánides* 25: 111-120.
- CERVANTES-DUARTE, R., S. LÓPEZ-LÓPEZ & E. GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ. 2007. Características hidrológicas de Bahía Magdalena, BCS, México, en el periodo 2001-2003. *CICIMAR Océánides* 22: 1-11.
- DE LA LANZA-ESPINO, G. & M. A. RODRÍGUEZ-MENA. 1993. Nutrient Exchange between Subtropical Lagoons and the Marine Environment. *Estuaries* 16 (2): 273-279.
- DURAZO R. 2015. Seasonality of the transitional region of the California Current System off Baja California. *Journal of Geophysical Research-Oceans* 120: 1173-1196. DOI: 10.1002/2014JC010405
- DURAZO, R. & T. R. BAUMGARTNER. 2002. Evolution of oceanographic conditions off Baja California: 1997-1999. *Progress in Oceanography* 54: 7-31.
- FUNES-RODRÍGUEZ, R., J. GÓMEZ-GUTIÉRREZ & R. PALOMARES-GARCÍA. 2007. *Estudios Ecológicos en Bahía Magdalena*, 311 p. Instituto Politécnico Nacional, La Paz Baja California Sur, México.
- GARCÍA ESCOBAR, H. 1992. Análisis del viento en el área frente a Bahía de San Hipólito y la zona comprendida entre bahía Magdalena y Cabo San Lucas. B.C.S., en junio y julio de 1989. *Res. IX Congreso Nacional de Oceanografía*. 28.
- GORDON, D. C., P. R. BOUDREAU, K. H. MANN, J. E. ONG, W. L. SILVERT, S. V. SMITH, G. WATTAYAKORN, F. WULFF & T. YANAGI. 1996. *LOICZ Biogeochemical Modelling Guidelines*. LOICZ/R&S/95-5, VI 96 p. LOICZ, Texel, the Netherlands.
- GUERRERO-GODÍNEZ, R., R. CERVANTES-DUARTE & A. R. JIMÉNEZ-ILLESCAS. 1988. Nutrient variations during a tidal cycle at the mouth of a coastal lagoon in the northwest of México. *Indian Journal of Marine Sciences* 17: 235-237.
- HAYES, M. O. 1975. Morphology of sand accumulation in estuaries: An introduction to the symposium. In: L.E. Croning (Ed.). *Estuarine Research*, Vol. II, Academic Press, New York, pp. 3-22.
- JEFFREY, S. & J. HUMPHREY. 1975. New spectrophotometric equations for determining Chlorophylls a, b, c1 and c2 in algal phytoplankton and higher plants. *Biochemie und Physiologie der Pflanzen* 167: 191-194.
- LANKFORD, R. R. 1977. Coastal Lagoons of Mexico. Their origin and classification. In: Wiley M (Ed). *Estuarine processes* 2. Academic Press, New York, pp. 182-216.
- MORALES-ZÁRATE, M. V., A. L. ARETXABAETA, F. E. WERNER & S. E. LLUCH-COTA. 2006. Modelación de la circulación invernal y la retención de partículas en el sistema lagunar Bahía Magdalena-Almejas (Baja California Sur, México). *Ciencias Marinas* 32: 631-647. DOI: 10.7773/cm.v32i4.1162
- MURILLO MURILLO, I., R. CERVANTES-DUARTE, G. GAXIOLA-CASTRO, S. LÓPEZ-LÓPEZ, F. AGUIRRE-BAHENA, E. GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, Á. JIMÉNEZ-ILLESCAS & F. E. HERNÁNDEZ-SANDOVAL. 2013. Variabilidad de la productividad primaria y de pigmentos fotosintéticos en una zona de surgencias de la región sur de la corriente de California. *CICIMAR Océánides* 28 (1): 23-26.
- REDFIELD, A. C., B. H. KETCHUM & F. A. RICHARDS. 1963. The influence of organisms on the composition of the sea-water. In: Hill M. N (Ed.). *The Sea. Ideas and observations on progress in the study of the seas 2. The composition of sea-water. Comparative and descriptive oceanography*. Interscience Publishers, New York, London / Sydney, pp. 26-77.
- RIBAS-RIBAS, M., J. M. HERNÁNDEZ-AYÓN, V. F. CAMACHO-IBAR, A. CABELLO-PASINI, A. MEJÍA-TREJO, R. DURAZO, S. GALINDO-BECT, A. J. SOUZA, J. M. FORJA & A. SIQUEIROS-VALENCIA. 2011. Effects of upwelling, tides and biological processes on the inorganic carbon system of a coastal lagoon in

- Baja California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 95: 367-376. DOI: 10.1016/j.ecss.2011.09.017
- ROBINSON, C. J., J. GÓMEZ-GUTIÉRREZ & S. GÓMEZ-AGUIRRE. 2007. Estudios ecológicos en Bahía Magdalena. *In: Funes-Rodríguez R, J Gómez-Gutiérrez & R Palomares-García (Eds.). Efecto de la dinámica de las corrientes de marea en los organismos pelágicos en la boca de Bahía Magdalena*. Instituto Politécnico Nacional, La Paz, Baja California Sur, México, pp. 45-58.
- SÁNCHEZ-MONTANTE, O., O. ZAITSEV & M. SALDIVAR-REYES. 2007. Estudios ecológicos en Bahía Magdalena. *In: Funes-Rodríguez R, J Gómez-Gutiérrez & R Palomares-García (Eds.). Condiciones hidrofísicas en el sistema lagunar Bahía Magdalena-Almejas*. Instituto Politécnico Nacional, La Paz, Baja California Sur, México, pp. 1-28.
- STRICKLAND, J. D. H. & T. R. PARSONS. 1972. *A practical handbook of seawater analysis*. Bulletin, Fisheries Research Board of Canada 167: p 310.
- VENRICK, E. & T. HAYWARD. 1984. Determining chlorophyll on the 1984 CAL-COFI Surveys. *CalCOFI, Reports* 25: 74-79.
- ZAITSEV, O., A. TRASVIÑA-CASTRO, J. LINERO-CUETO, G. GAXIOLA-CASTRO & J. CEPEDA-MORALES. 2014. Condiciones oceanográficas en la plataforma continental frente a bahía Magdalena (México) en 2011-2012. *Ciencias Marinas* 40 (2): 89-112. DOI: 10.7773/cm.v40i2.2314.
- ZAITSEV, O., O. SÁNCHEZ-MONTANTE & C. J. ROBINSON. 2007. Estudios ecológicos en Bahía Magdalena. *In: Funes-Rodríguez R., J. Gómez-Gutiérrez & R. Palomares-García (Eds.). Características del ambiente hidrofísico de la plataforma continental y zona oceánica adyacente al sistema lagunar Magdalena-Almejas*. Instituto Politécnico Nacional, La Paz, Baja California Sur, México, pp. 29-43.
- ZAITSEV, O., R. CERVANTES-DUARTE, O. MONTANTE & A. GALLEGOS-GARCÍA. 2003. Coastal upwelling activity on the Pacific shelf of the Baja California Peninsula. *Journal of Oceanography* 59: 489-502.