



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO**



DE

CIENCIAS MARINAS

DEPARTAMENTO DE OCEANOLOGÍA

**ESTUDIO A MICROESCALA DE LOS NUTRIENTES Y
VARIABLES HIDROLÓGICAS EN BAHÍA MAGDALENA, B. C. S.,
MÉXICO.**

TESIS QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN MANEJO DE
RECURSOS MARINOS**

PRESENTA:

QUÍMICO LUISA MARGARITA RODRÍGUEZ MATA

La Paz, Baja California Sur, México, mayo del 2006



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., siendo las 12:00 horas del día 2 del mes de Mayo del 2006 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICIMAR para examinar la tesis de grado titulada:

"ESTUDIO A MICROESCALA DE LOS NUTRIENTES Y VARIABLES HIDROLÓGICAS EN BAHÍA MAGDALENA, B.C.S., MÉXICO"

Presentada por el alumno:

RODRÍGUEZ
Apellido paterno

MATA
materno

LUISA MARGARITA
nombre(s)

Con registro:

B	0	4	1	2	0	3
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante al grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Director de tesis
PRIMER VOCAL

DR. RAFAEL CERVANTES DUARTE

PRESIDENTE

DR. OLEG ZAITSEV VIKTOROVICH

SECRETARIO

DR. JAIME GÓMEZ GUTIÉRREZ

SEGUNDO VOCAL

DR. EVGUENI CHOUMILINE NIKOLAYEVICH

TERCER VOCAL

DR. GUILLERMO GUTIÉRREZ DE VELASCO

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. RAFAEL CERVANTES DUARTE



I. P. N.
CICIMAR
DIRECCION



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., el día 2 del mes Mayo del año 2006, el (la) que suscribe LUISA MARGARITA RODRÍGUEZ MATA alumno(a) del Programa de MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS con número de registro B041203 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de: DR. RAFAEL CERVANTES DUARTE y cede los derechos del trabajo titulado: "ESTUDIO A MICROESCALA DE LOS NUTRIENTES Y VARIABLES HIDROLÓGICAS EN BAHÍA MAGDALENA, B.C.S., MÉXICO" al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: lrodriguez@edimar.org
Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.


LUISA MARGARITA RODRÍGUEZ MATA
nombre y firma

Agradecimientos

Ante todo agradezco a Dios por haberme dado salud y sabiduría para concluir este gran reto.

A mi maravillosa familia por su amor.

Al proyecto CGEPI-20050402 del cual fue parte del trabajo de tesis, "Variación nictimeral de los nutrientes inorgánicos disueltos en Bahía Magdalena" dirigido por el Dr. Rafael Cervantes Duarte.

Al programa Institucional de Formación de Investigadores (PIFI) del IPN por el apoyo otorgado durante el desarrollo de la tesis.

Al comité de asesores: Dr. Oleg Zaitsev Viktorovich, Dr. Jaime Gómez Gutiérrez, Dr. Evgueni Choumiline Nikolayevich, al Dr. Guillermo Gutiérrez De Velasco, Dr. Rafael Cervantes Duarte.

Un especial agradecimiento al Dr. Silverio López López por su asesoría, disponibilidad, colaboración y por tantas horas de consultas y discusiones. Amigo mil gracias.

A la Capitanía de Puerto San Carlos por prestarnos la embarcación en agosto del 2005.

Un inmenso agradecimiento a mis amigos del Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas CICIMAR-IPN, la verdad son espectaculares...Mil gracias

Finalmente, a mis amigos y al personal directivo de la Estación de Investigaciones Marinas de Margarita (EDIMAR), Fundación La Salle de Ciencias Naturales, Venezuela, por todo el apoyo brindado.. Mil gracias

CONTENIDO

RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	x
1.- INTRODUCCIÓN	1
1.1.- Antecedentes	6
2.2.- Justificación.....	10
2.3.- Hipótesis.....	11
2.4.- Objetivos	11
2.5.- Área de estudio	12
3.- MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
3.1.- Trabajo de Campo:.....	17
3.2.- Trabajo de Laboratorio:	19
3.3.-Tratamiento de datos:.....	20
4.- RESULTADOS.....	22
4.1.- CICLO NICTIMERAL:	22
4.1.1.- Condiciones de Marea (Nivel del mar):	22
4.1.2.- Características termohalinas y oxías de la columna de agua.....	24
4.1.3.-Distribución y Variabilidad de los Nutrientes.	33
4.1.4.-Clorofila a	38
4.2. DISTRIBUCIÓN HORIZONTAL (Red de estaciones).....	43
4.2.1. Distribución de la temperatura superficial (TS).....	43
4.2.2. Nitrito.	44
4.2.3. Nitrato.	44
4.2.4. Fosfato.....	47
4.2.5. Clorofila a.	47
5.- DISCUSIÓN	52
6.- CONCLUSIÓN:	76
7. RECOMENDACIONES	¡Error! Marcador no definido.
8.- BIBLIOGRAFIA	80
9. ANEXOS	87

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Área de estudio	15
Fig. 2. Mapa batimétrico del área de estudio (Cortesía de Murillo Jiménez, 2006)	16
Fig. 3. Red de estaciones y estación fija de muestreo en los ciclos de 24 horas (X)..	21
Fig. 4. Altura de la marea en los meses de diciembre-04 y junio-05. Las líneas verticales punteadas delimitan el periodo de muestreo.	23
Fig. 5. Altura de la marea en los meses de agosto-05 y noviembre-05. Las líneas verticales punteadas delimitan el periodo de muestreo.	¡Error! Marcador no definido.
Fig. 6. Distribución de temperatura, salinidad y densidad en la columna de agua durante el ciclo nictimeral de diciembre-04. Las flechas indican las horas de los perfiles verticales seleccionados.	26
Fig. 7. Distribución de temperatura, salinidad y densidad en la columna de agua durante el ciclo nictimeral de junio-05. Las flechas indican las horas de los perfiles verticales seleccionadas.	27
Fig. 8. Distribución de temperatura, salinidad y densidad en la columna de agua durante el ciclo nictimeral de agosto-05. Las flechas indican las horas de los perfiles verticales seleccionadas.	29
Fig. 9. Distribución de temperatura, salinidad y densidad en la columna de agua durante el ciclo nictimeral de noviembre-05. Las flechas indican las horas de los perfiles verticales seleccionadas.	31
Fig. 10. Distribución del O ₂ en la columna de agua durante el ciclo en el mes de diciembre-04 (a), junio-05 (b), agosto-05 (c) y nov-05 (d).	32
Fig. 11. Distribución de nitritos, nitratos, fosfatos y altura de la marea en diciembre del 2004. No se registraron valores de amonio	35
Fig. 12. Distribución de amonio, nitritos, nitratos, fosfatos y altura de la marea en el mes de junio del 2005.	37
Fig. 13. Distribución de amonio, nitritos, nitratos, fosfatos y altura de la marea en el mes de agosto del 2005.	39

Fig. 14. Distribución amonio, nitritos, nitratos, fosfatos y altura de la marea en el mes de noviembre del 2005.	40
Fig. 15. Distribución de Cla en la columna de agua durante el ciclo en el mes de junio-05 (b), agosto-05 (c) y nov-05 (d). En diciembre no se registraron valores de Cl a.....	42
Fig. 16. Distribución horizontal de la temperatura (°C) en los meses de muestreo. En el fondo de la gráfica se presenta el promedio e intervalo de confianza al 95%	45
Fig. 17. Distribución horizontal de nitritos (μM) en los meses de muestreo. En el fondo de la gráfica se presenta el promedio e intervalo de confianza al 95%	46
Fig. 18. Distribución horizontal de nitratos (μM) en los meses de muestreo. En el fondo de la gráfica se presenta el promedio e intervalo de confianza al 95%	49
Fig. 19. Distribución horizontal de fosfato (μM) en los meses de muestreo. En el fondo de la gráfica se presenta el promedio e intervalo de confianza al 95%	50
Fig. 20. Distribución horizontal de clorofila a (mg/m^3) en los meses de muestreo. En el fondo de la gráfica se presenta el promedio e intervalo de confianza al 95%	51
Fig. 21. Distribución y variabilidad de amonio en junio (la escala fue modificada para ver la relación con la marea)	58
Fig. 22. Relación TS en los meses de muestreos durante el ciclo de 24 h en la columna de agua.....	71
Fig. 23. Relación de NID (suma de amonio, nitrito y nitrato) con los fosfatos en la columna de agua en diferentes meses del año. La línea representa la razón de Redfield, 16:1.	75

LISTA DE TABLAS

Tabla I. Amplitud de la marea en diferentes condiciones de marea para cada mes de muestreo (Fuente de datos horarios: www.oceanografía.cicese.mx)	22
Tabla II. Intervalo de concentración de nutrientes en los meses de muestreo	34
Tabla III. Contribuciones del amonio, nitrito y nitrato como fuentes de nitrógeno en la columna de agua.	68
Tabla IV. Valores de prisma de marea (V_p) y el tiempo de residencia (τ_g) en la fase de marea muerta y marea viva para Bahía Magdalena (Tomado de Sánchez-Montante, 2005).	88

RESUMEN

Se realizaron muestreos en diferentes meses del año para evaluar las concentraciones de nutrientes y variables hidrológicas en Bahía Magdalena, y la importancia del intercambio entre el agua de la laguna y la zona costera adyacente, bajo diferentes condiciones de marea, en época de surgencias y durante el relajamiento de la misma. Los muestreos fueron divididos en dos etapas, la primera etapa consistió en realizar ciclos de 24 horas en la boca principal de la bahía, y la segunda consistió en realizar muestreos en una red de 14 estaciones ubicadas en el interior de la bahía. En los ciclos de 24 horas se tomaron registros de temperatura y salinidad (CTD) y muestras de agua a nivel superficial, media agua y fondo para análisis de oxígeno disuelto, nutrientes (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-}), y clorofila *a*, cada 2 horas. En la red de estaciones se tomaron muestras de agua superficiales para el registro de temperatura y el análisis de los nutrientes (NO_2^- , NO_3^- y PO_4^{3-}) y clorofila *a*. En la boca principal de BM los perfiles verticales de temperatura, salinidad y densidad indicaron condiciones de mezclado en invierno y estratificación en verano y otoño. En el área de La Bocana se identificaron dos tipos de aguas: una corresponde a aguas de la plataforma continental con salinidades inferiores de 33.7 ups y temperaturas entre 16 y 21 °C; y la otra corresponde a aguas propias de la bahía con salinidades mayores a 33.9 ups y temperaturas entre 16 y 23 °C. La distribución y variabilidad de los nutrientes durante el ciclo nictimeral estuvo fuertemente relacionado a las características termohalinas de la columna de agua. Durante los eventos de surgencias existe una importación NO_3^- y exportación de clorofila *a* de origen fitoplanctónico. Esta importación

fue más evidente en mareas vivas y durante periodos de relajamiento de surgencias (agosto). Este es el primer trabajo que estima valores y tendencias del amonio en BM; encontrándose que en periodos sin la influencia de surgencias, el nitrógeno amoniacal contribuyó de manera significativa como fuente de nitrógeno al sistema. En el interior de la bahía la distribución de nutrientes y clorofila *a* aunque fue más dinámica y compleja, obedece a la entrada de agua fría subsuperficial cargadas de nutrientes durante las surgencias (marzo – julio), de la mezcla de los nutrientes que está en función de los tiempos de residencia de agua y la dominancia de los procesos biogeoquímicos locales en épocas cuando la importación de nutrientes al sistema es insignificante. Las razones N:P registradas usualmente están por debajo de la razón de Redfield (16:1), debido probablemente a la limitación del nitrógeno en la zona.

ABSTRACT

During different months of year samplings were carried out in Bay Magdalena, Baja California Sur, in order to evaluate the importance of the interchanges between the lagoon and the adjacent coastal zone, under tide different conditions, at time of upwelling process and outside them. Physical and chemical parameters (temperature, salinity and oxygen, and ammonium, nitrites, nitrates, phosphates and chlorophyll *a*) were measured in the water column during a complete tidal cycle (24 hours) at the main mouth of the bay. In addition an spatial survey in 14 stations located inside the bay were sampled, surface temperature and surface nitrites, nitrates, phosphates and chlorophyll *a* were evaluated. The data set shows the vertical profiles of temperature, salinity and density indicated conditions of mixed and stratification in the main mouth of BM. Inorganic nutrients distribution during tidal cycle was strongly related to the physical characteristics of the water column. During upwelling process it exists nitrate import and chlorophyll *a* export of phytoplankton origin. Downwelling ammonium contributes significant way as nitrogen source to the system. Inside the bay the nutrients distribution and chlorophyll *a* it were based on the residence times of water and nutrient remineralization in sediments and the effect induced turbulence by tidal currents. The N:P ratios are below Redfield ratio (16:1), it seems that this situation must be caused by nitrogen sinking in sediments.

1. INTRODUCCIÓN

La costa occidental de la Península de Baja California es parte de la región del Sistema de la Corriente de California, una de las áreas más productivas del mundo. En su recorrido de norte a sur la masa de agua de la Corriente de California cambia lentamente sus propiedades físicas, químicas y biológicas, incrementando su salinidad y temperatura, debido a la radiación solar y la mezcla con aguas más cálidas y salobres del Pacífico Central (Reid *et al.*, 1958). A lo largo de la Costa Oeste de Baja California Sur, los cambios estacionales inducen a la alternación fuerte entre condiciones eutróficas y oligotróficas (Longursht *et al.*, 1967). Las condiciones eutróficas están asociadas con eventos de surgencias y con la presencia fuerte de la Corriente de California en el área, mientras las condiciones oligotróficas son el resultado de condiciones de estratificación y la presencia de la Corriente Mexicana (Lavin *et al.*, 1977.).

La alta productividad primaria en la costa del Pacífico de la Península de Baja California es usualmente relacionada a la actividad de surgencias costeras que introducen nutrientes dentro de la zona eufótica, en respuesta al forzamiento del viento a lo largo de la costa. Estas surgencias producen gradientes horizontales en la distribución de propiedades físicas (e.v. temperatura, salinidad) y químicas (v.g. oxígeno disuelto, pH, alcalinidad, nutrientes) caracterizado también por marcados gradientes verticales (Tórres-Moye y Acosta-Ruiz, 1986). Casi en toda la costa de la península los cambios de intensidad de las surgencias están en concordancia con las condiciones del viento local y la topografía del fondo. La significancia de los procesos

de surgencia costera sobre los nutrientes ha sido relativamente bien documentada en la costa del Pacífico de la península de Baja California (Bakun y Nelson, 1977; Cervantes-Duarte, 1992; Zaytsev *et al.*, 2003).

Las lagunas costeras dominadas por la marea corrientes y vientos como Bahía Magdalena (BM), son ecosistemas complejos y dinámicos cuyas propiedades físicas, químicas y biológicas muestran un fuerte gradiente de distribución con variabilidades que van desde periodos cortos hasta estacionales (Nogueira *et al.*, 1997). Uno de los factores más significativos en la distribución de las variables en la bahía es la dinámica de las corrientes provocadas por las mareas. La marea es un componente importante de la energía en las lagunas costeras, que provocan erosión, transporte de sedimentos y organismos, provocan procesos de mezcla (Lankford, 1977) y transportan también nutrientes cuando están acoplados a procesos de surgencias (Zaytsev *et al.*, 2003).

La mayoría de los estudios realizados en lagunas con conexiones con el mar indican que parte de la biomasa producida en las lagunas es exportada hacia el océano; que la materia orgánica es remineralizada en la columna de agua y en los sedimentos; y que una porción de esta es importada en formas de nutrientes inorgánicos a la bahía. En general, dentro de las lagunas, los procesos biogeoquímicos son extremadamente complejos debido a las interacciones con los sedimentos y a la competencia béntica-pelágica de los productores primarios (Keizer *et al.* 1989; Fourqurean *et al.*, 1993). El proceso de regeneración de los nutrientes es también fundamental en la disponibilidad de los nutrientes, que son llevados a cabo en la interfase sedimento-agua, por medio de actividades bacterianas, existiendo una

estrecha asociación entre el suministro de materia orgánica y la presencia de nutrientes. En el caso del reciclamiento del nitrógeno, la acumulación en los sedimentos es una de las principales causas de la pérdida de este elemento en su ciclo biogeoquímico, regulando así su concentración y, por consecuencia la productividad primaria de los sistemas marinos costeros (Lohse *et al.*, 1993). En el caso del fósforo, la gran capacidad de los sedimentos y los sólidos suspendidos para liberar o secuestrar fósforo, mantiene las variaciones de concentración dentro de un rango relativamente estrecho (Froelich, 1988).

En 1934 Redfield examinó la relación entre las concentraciones de oxígeno, dióxido de carbono, nitrato y fosfato en el mar basado en la composición química promedio del plancton (Millero, 1996). La razón de Redfield C:N es usado en oceanografía para calcular la producción exportada, y para cálculos de productividad basado en nutrientes, también como en modelos de productividad del océano. La razón Redfield N:P es a menudo frecuentemente utilizado como referencia para diferenciar las limitaciones de nitrógeno y fósforo en ecosistemas marinos (Geider y La Roche, 2002). Según Pilson (1998) en aguas costeras someras usualmente el nitrógeno es el nutriente limitante. Los estudios realizados en agua costera, indican que la razón N:P está siempre por debajo de la razón de Redfield. Al parecer esta situación podría ser causada por activos procesos de desnitrificación en los sedimentos de estos sistemas. Para sistemas costeros que se conectan permanentemente con el océano, los nutrientes disueltos y particulados en el agua de mar puede ser la principal fuente de

los nutrientes inorgánicos requeridos para sostener la productividad local del ecosistema (Falcao-Vale, 2003).

La literatura indica que dependiendo de la localización relativa de la base de la capa de mezcla superficial y el tope de la nutriclina, los nutrientes inorgánicos disueltos son llevados a la zona eufótica por una variedad de procesos de pequeña escala, como turbulencia en la superficie inducida por el viento o rompimiento de olas, convección libre inducida por la pérdida de calor superficial, entre otros (Gargett, 1997). La relevancia de las escalas de tiempo se puede apreciar en el orden de varias horas en el contexto de la variabilidad diurna de la estratificación cercana a la superficie por las corrientes de marea. Es decir, en la noche, la pérdida de calor de la superficie conduce a movimientos convectivos que mueven las células del fitoplancton progresivamente lejos de la superficie. Después de la salida del sol, el calentamiento de la superficie frena los movimientos convectivos, y las células cercanas a la superficie se mantienen atrapadas por la formación de una termoclina diurna somera, hasta poco antes de la puesta de sol. La fuerte estratificación vertical inhibe severamente los movimientos verticales asociados con los flujos turbulentos verticales. Contrariamente, cuando la columna de agua está débilmente estratificada, excursiones verticales y flujos pueden ser significativos (Gargett, 1997).

Los nitratos, nitritos y amonio (NID) pueden ser captados (vía transporte a través de membranas) y asimilados por muchos organismos. Desde el punto de vista del costo bioenergético, existen marcadas diferencias entre la utilización de las formas oxidadas (nitratos y nitritos) y las formas reducidas (amonio). Los nitratos y los nitritos deben ser

reducidos previamente a amonio (por medio de la nitrato y nitrito reductasa) (Hattori y Myers, 1966) y el amonio es convertido en glucosamato (por medio del glucosamato deshidrogenasa). Estas diferencias hacen que el amonio sea utilizado preferencialmente en comparación con el nitrito y nitrato. A partir de una concentración ambiental de amonio entre 0.5-1.0 μM , la absorción del nitrato y nitrito se inhibe parcialmente y se utiliza preferentemente el amonio (Syrett, 1981; Lomas y Glibert, 1999). El nitrógeno regenerado en la zona eufótica es asimilado como amonio (producción regenerada). Sin embargo, el nitrógeno nuevo puede entrar en la zona eufótica a través de precipitaciones, fijación de nitrógeno, eventos de surgencias, difusión lateral o descarga de ríos (producción nueva) (Dugdale y Goering, 1967). Particularmente, las zonas de surgencia costera llevan nutrientes nuevos (NO_3^-) hacia la capa de mezcla donde promueven los florecimientos y la generación de material orgánico, lo cual propicia la congregación de organismos consumidores secundarios y terciarios (Cervantes-Duarte, *et al.*, 1992). En BM suponemos que una entrada de nitrógeno nuevo en cantidades significativas se da por medio del efecto combinado de los eventos de surgencias y las corrientes de marea en las zonas de conexión de la bahía con la plataforma continental.

Por lo anteriormente expuesto en este trabajo se estudian las variaciones a microescala (< 24h) de las concentraciones de los nutrientes (incluyendo el amonio) en función de los cambios hidrológicos ocurridos durante ciclos de marea; en época de surgencia y fuera de ella. Esto nos permitirá establecer relaciones desde una escala local ó puntual y extrapolar lo ocurrido en el resto de la laguna.

2. Antecedentes

El sistema lagunar Magdalena-Almejas tiene especial interés por su potencial económico y situación geográfica estratégica. Se han llevado a cabo estudios en múltiples áreas, dirigidos especialmente a su descripción oceanográfica en todos sus aspectos, físicos, químicos y biológicos. Pero, a pesar de su indudable importancia estatal y nacional, realizándose desde los años 70's, los estudios físicos y químicos en BM han sido muy escasos. Por ejemplo, de un total de 167 trabajos realizados en BM desde 1975 hasta 2005, las áreas de plancton y pesquerías hacen un total de 83 % del total de los trabajos (Figura 1).

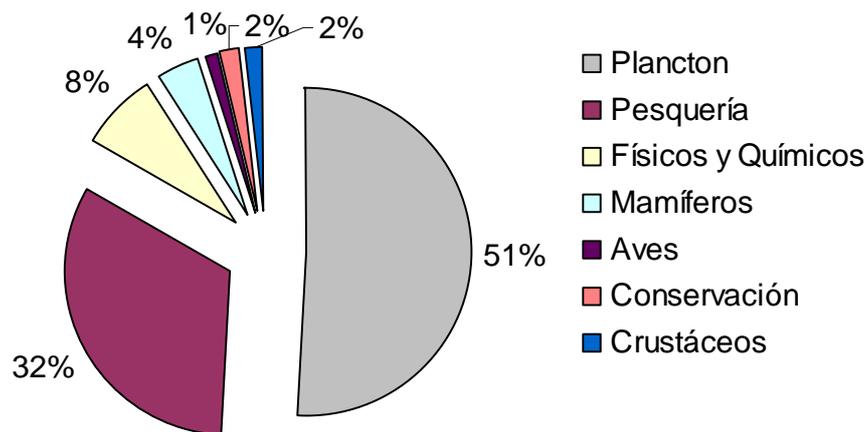


Figura 1. Contribución relativa de las publicaciones dedicadas a los estudios de BM.

Los pioneros en realizar estudios oceanográficos en BM son Álvarez-Borrego *et al.* (1975). Estos autores encuentran que los gradientes de temperatura y salinidad

dentro de la bahía están inversamente relacionado con la batimetría. Acosta-Ruiz y Lara-Lara (1978) indican que en el interior de la bahía existen zonas con características físicas y químicas distintas que obedecen al transporte de agua oceánica por las corrientes de mareas y a los procesos de evaporación en las zonas más someras. Según Sánchez-Montante (2004), las condiciones físicas del interior de BM tienen en general una significativa mezcla vertical, debido al viento local y la fricción del fondo. Lluch-Belda *et al.* (2000) indican que la influencia de aguas oceánicas frías del exterior de BM y la alta evaporación en su interior producen intensos gradientes de temperatura superficial, con diferencias de casi 7 °C entre el periodo más frío del año (marzo, 20.3°C) y el más cálido (septiembre, 26.9 °C). Además observan, que las condiciones de homogeneidad (invierno) dan paso a heterogeneidad e intensos gradientes hacia el final de la temporada de surgencias.

Las condiciones tróficas observadas a lo largo de la Costa Oeste de Baja California Sur están asociadas con eventos de surgencias y con la presencia fuerte de la Corriente de California en el área (Lavin *et al.*, 1977). Específicamente en BM, Gómez-Gutiérrez *et al.* (2001) encuentran que la estructura de la comunidad de zooplancton en la boca de BM experimentó significativos cambios estacionales en relación con las condiciones ambientales. En tres temporadas del año observaron cambios en las características hidrográficas de la columna de agua asociadas con la presencia de la Corriente de California, de procesos de afloramiento local, y la influencia de la Corriente de Costa Rica. La variabilidad anual en la abundancia y distribución de los huevos y larvas de peces en BM está también relacionada con las condiciones ambientales (Funes *et al.*, 1998). En la zona central de BM se presentaron

condiciones muy semejantes a eventos de surgencias, que provocan un aporte de nutrientes en la superficie de la bahía, aumentando grandemente su fertilidad (Álvarez-Borrego, *et al.*, 1975). El sistema lagunar Bahía Magdalena depende del flujo de nutrientes de las aguas costeras adyacentes; haciéndolo una zona altamente productiva (Guerrero-Godinez *et al.*, 1988). Zaytsev, *et al.* (2003) indicaron que los eventos de surgencia costeras son más intensos de marzo a julio. El transporte vertical de nutrientes, combinado con la batimetría y el transporte horizontal por corriente de marea favorecen la entrada de nutrientes al sistema lagunar. Estos autores reportaron en febrero nitratos altos en la parte central de BM enfrente de la boca principal y en aguas pocas profundas; y nitritos altos en la boca y el área oceánica adyacente. Además, las concentraciones de clorofila *a* fueron altas en el interior frente de la boca principal y bajas en aguas poco profundas. Sánchez-Rodríguez y Cervantes-Duarte (1999) informaron que la mayor longitud y biomasa de la macroalga *Sargassum sinicola* Setchell *et* Gardner (Phaeophyta) ocurren en los meses de verano y principio del otoño, cuando se registran con mayor intensidad y frecuencia surgencias costeras, con temperaturas bajas, nitratos y fosfatos por arriba del promedio registrado en la capa superficial, durante las surgencias. Los valores máximos de abundancia fitoplanctónica y de diversidad del microplancton se registraron durante las temperaturas bajas, desde noviembre a mayo (Garate-Lizarraga *et al.*, 2001).

La modulación de las variables físicas y químicas por la marea en BM ha sido observada por muchos autores. Acosta-Ruiz y Lara-Lara (1978) encuentran que los parámetros presentan una periodicidad muy parecida a una curva de marea. Los valores de salinidad y clorofila *a* fueron máximos en el reflujos y mínimos en flujo. Los

fosfatos mostraron una tendencia irregular de variación durante el ciclo diurno (1.00 y 2.5 μM). Guerrero-Godinez *et al.* (1988) encuentran altas concentraciones de nutrientes durante el flujo y bajas durante el reflujó. Los valores de salinidad y clorofila *a* son máximos durante el reflujó de la marea. Hernández-Trujillo *et al.* (1997) indicaron que el factor dominante en la variabilidad de las condiciones ambientales fue la marea, pero las variaciones de nutrientes y oxígeno disuelto se deben a otros procesos complejos, como la mezcla debida al viento y la dinámica de los florecimientos dentro de BM. Rosales-Villa (2004) encontró que en el interior de BM, las concentraciones de nutrientes no presentan un patrón característico relacionado con las mareas, y que existe aporte de fosfato, silicato y clorofila *a* desde la boca del canal San Gil hacia la parte NW de la bahía y núcleos de alta concentración de nutrientes en la boca del estero El Chisquete, en Punta Cove y en Punta Delgada.

2.2.- Justificación

Hasta ahora se tiene un conocimiento básico de las características hidrológicas y biológicas que se presentan en el cuerpo de agua del complejo lagunar Magdalena-Almejas. Sin embargo, se desconocen aspectos particulares de los procesos físicos, químicos y biológicos, que permitan tener una idea de las velocidades a la que se llevan a cabo dichos procesos, es decir, se desconoce el efecto de la marea y de los procesos de interacción aire-agua y agua-sedimento en BM. Adicionalmente, las investigaciones hasta ahora no han logrado definir bien, si la bahía es fuente o sumidero de nutrientes inorgánicos disueltos (NID). No han logrado estimar los flujos verticales de nutrientes. Además, las zonas de surgencias aportan nutrientes nuevos (nitratos y silicatos) al sistema, pero se desconocen los niveles de nutrientes reciclados como el amonio y el fosfato.

En ecosistemas complejos y dinámicos de alta productividad, como el sistema lagunar Magdalena-Almejas es necesario realizar estudios en escalas de tiempos cortos (microescala) para entender la variabilidad de la asimilación de nutrientes por el fitoplancton. Además, esto permite evaluar las tendencias y las continuas transformaciones que sufre el ecosistema en función de los intercambios entre la laguna y la zona oceánica adyacente. Por ello el presente estudio tiene particular interés en los procesos que ocurren en la boca principal, para establecer relaciones a nivel regional de los NID, clorofila *a* y de otras variables hidrológicas.

2.3. Hipótesis

Bahía Magdalena proporcionalmente importa más NID que exporta por el efecto combinado de las surgencias costeras en la plataforma continental y el intercambio de marea a escalas espacio temporales asociados a estos dos procesos horas y días respectivamente.

2.4. Objetivos

Objetivo General:

Estudiar las variaciones a microescala de las concentraciones de los nutrientes (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-}) en las aguas de la Bocana de Bahía Magdalena, estacionalmente durante un ciclo anual 2004 – 2005.

Objetivos Específicos:

1. Estudiar las variaciones espacio temporales de la concentración de nutrientes inorgánicos disueltos, oxígeno disuelto y clorofila *a* en función de los cambios hidrológicos ocurridos durante ciclos de marea en la Bocana y en una red de estaciones de BM.
2. Evaluar el comportamiento del amonio en época de surgencias y durante el relajamiento de la misma.
3. Establecer relaciones a nivel regional entre las concentraciones de los nutrientes y las variables hidrológicas de las aguas del área de interés.

2.5.- Área de estudio

El complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas (Fig.1) es un cuerpo de agua costero, localizado en la costa suroccidental de Baja California Sur, entre los 24 ° 30´ y 25° 48´ N, 111°48´ y 112°00´ W. La bahía se encuentra en el centro de la cuenca La Purisima-Iray Magdalena y se caracteriza por amplias llanuras en las cuales destacan aisladamente algunas sierras y mesetas formadas por rocas volcánicas y volcanso clásticas. Se encuentra separada del océano adyacente por barreras arenosas y montañosas, las cuales están conformadas por rocas sedimentarias, manglares y playas locales con dunas bien desarrolladas. Los sedimentos de la plataforma continental y la descarga intermitente de arroyos formados por las lluvias estacionales, son la fuente de los sedimentos (Murillo *et al.*, 1997). Este sistema lagunar está parcialmente encerrado por las Islas Magdalena, Margarita y Creciente. Cada bahía tiene una boca única a través de la cual interactúa dinámicamente con las aguas de la plataforma continental del Océano Pacífico.

Se pueden distinguir tres zonas en el sistema lagunar Magdalena-Almejas (Álvarez-Borrego *et al.*, 1975): a) la zona noroeste (Zona de Canales) tiene un contorno irregular compuesta de numerosos estuarios, lagunas y canales con una profundidad promedio de 3.5 m y un área que abarca cerca de los 140 Km² y que se encuentra interconectada con el canal de San Carlos a través de un estrecho canal, Canal de Santo Domingo, de profundidad máxima de 10 m. En la región norte de este canal se conecta con el océano abierto a través de dos bocas relativamente angostas poco profundas; b) la zona central (Bahía Magdalena) es el cuerpo de agua que mayor

extensión tiene dentro del sistema lagunar, 550 Km² de área superficial (con un área cerca de 880 Km²) conectada al Pacífico a través de una boca (La Bocana) que mide aproximadamente 4.7 km y de 40 m de profundidad. El volumen promedio de agua que almacena es del orden de 7 Km³ (Sánchez-Montante, 2004). Cerca de la boca principal de BM hay una cuenca de 40 m de profundidad, llamada cuenca Magdalena; c) la zona suroeste (Bahía Almejas) tiene un área de 370 Km², se conecta a BM y al océano abierto a través de un canal somero; tiene una profundidad promedio de 8 m, sin embargo las profundidades alcanzan 27 m. A su vez estas tres regiones están interconectadas entre sí mediante canales pocos profundos (<12m). Al noroeste, se comunica BM y zona de canales a través del canal San Carlos (~5 km de ancho) y en el sureste, Bahía Magdalena con Bahía Almejas a través del canal Gaviota (~2.5 km de ancho) (Fig. 2).

2.5.1. Características del sistema lagunar Magdalena-Almejas

A continuación se hace una breve descripción de las principales características que describen al sistema lagunar Magdalena-Almejas:

- i) Clima:** el clima de la región es seco, semidesértico, con un promedio anual de temperatura que oscila entre los 22 °C y 24 °C. El promedio anual de lluvia es inferior a 200 mm (verano) (Zaytsev *et al.*, 2003).
- ii) Viento:** la intensidad promedio del viento es de 5 m/s (Sánchez-Montante, 2004). En verano hay un sistema prevaleciente de brisas que causan cambio diarios en la intensidad y/o dirección de los vientos. Los vientos dominantes del sur ocurren desde julio a septiembre, mientras que los vientos del noroeste ocurren de diciembre a mayo,

algunas veces en julio. Hay también la influencia de tormentas tropicales del sur en verano y frentes fríos del norte en invierno (Zaytsev *et al.*, 2003).

iii) Corrientes y mareas: en la boca de BM la intensidad de la corriente durante la marea viva es 0.45 – 0.47 m/s en flujo/reflujo y en los canales del interior del sistema las velocidades alcanzan en promedio 0.32 m/s con fluctuaciones de más de 0.15 m/s (Sánchez-Montante, 2004). El régimen de mareas es mixto principalmente semidiurno, ya que presenta dos máximos y dos mínimos en la intensidad en un período de aproximadamente 24.8 horas (Obeso *et al.*, 1999; Sánchez-Montante, 2004).

iv) Surgencias: los procesos de surgencias frente a BM tienen una intensidad máxima de abril a junio (Zaytsev *et al.*, 2003), con índices de surgencia costera que varían entre 50 a 300 m³/s*100 m de la línea de costa (Bakun y Nelson, 1977).

v) Biodiversidad: el complejo lagunar Magdalena-Almejas tiene una relativamente alta biodiversidad por localizarse en una zona de transición, incluyendo peces y otros organismos marinos de alto valor comercial; también es refugio de crianza y reproducción de la ballena gris y la tortuga, entre otros. El área es un excelente lugar de reclutamiento de varias especies pelágicas, como la sardina y macarela (Casas Valdés, 1987). La comunidad bentónica también tiene una relativa elevada biodiversidad, de poblaciones económicamente significativa (Feliz-Pico y García-Domínguez, 1992).

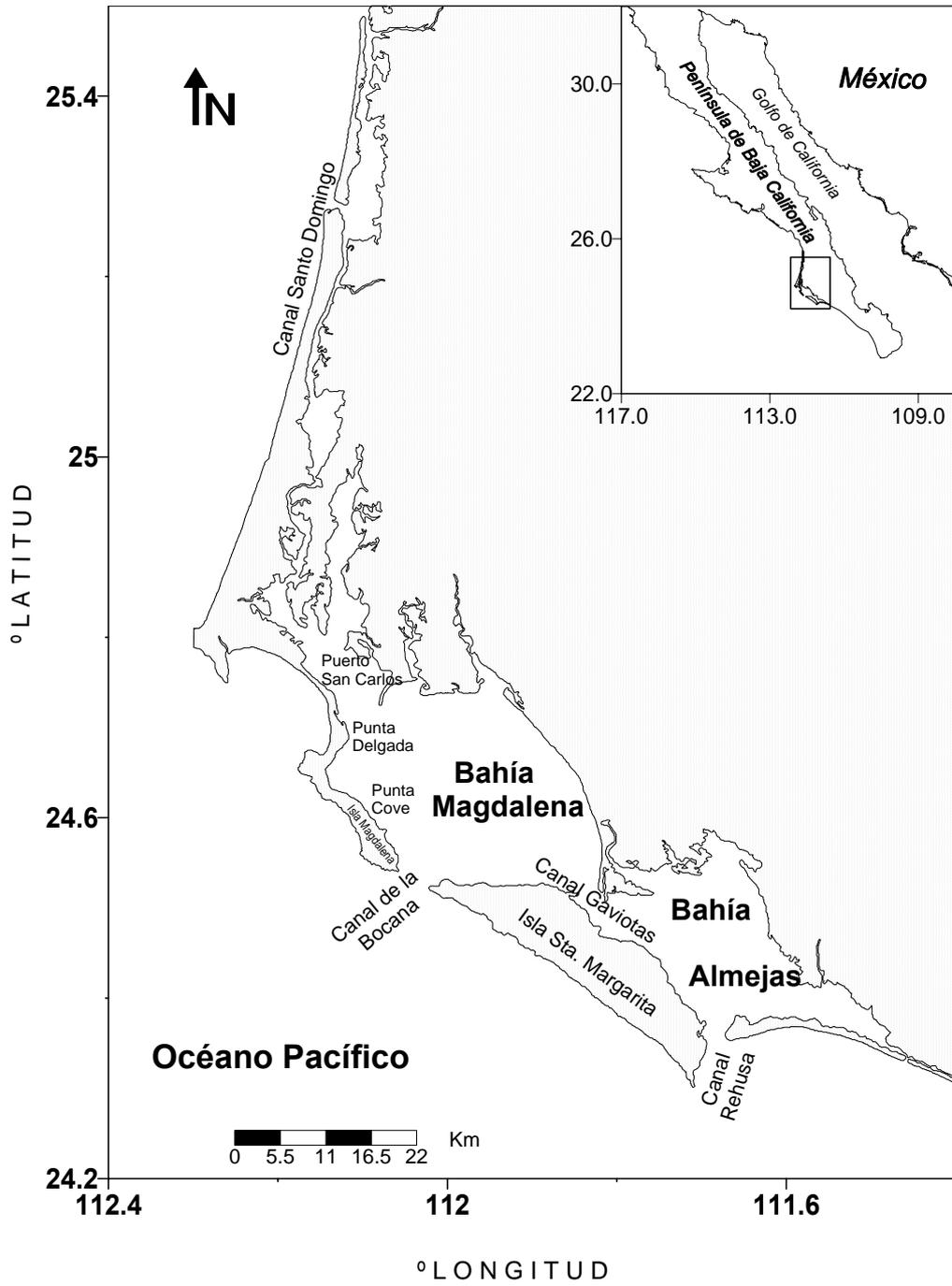


Fig. 1. Toponimia del área de estudio

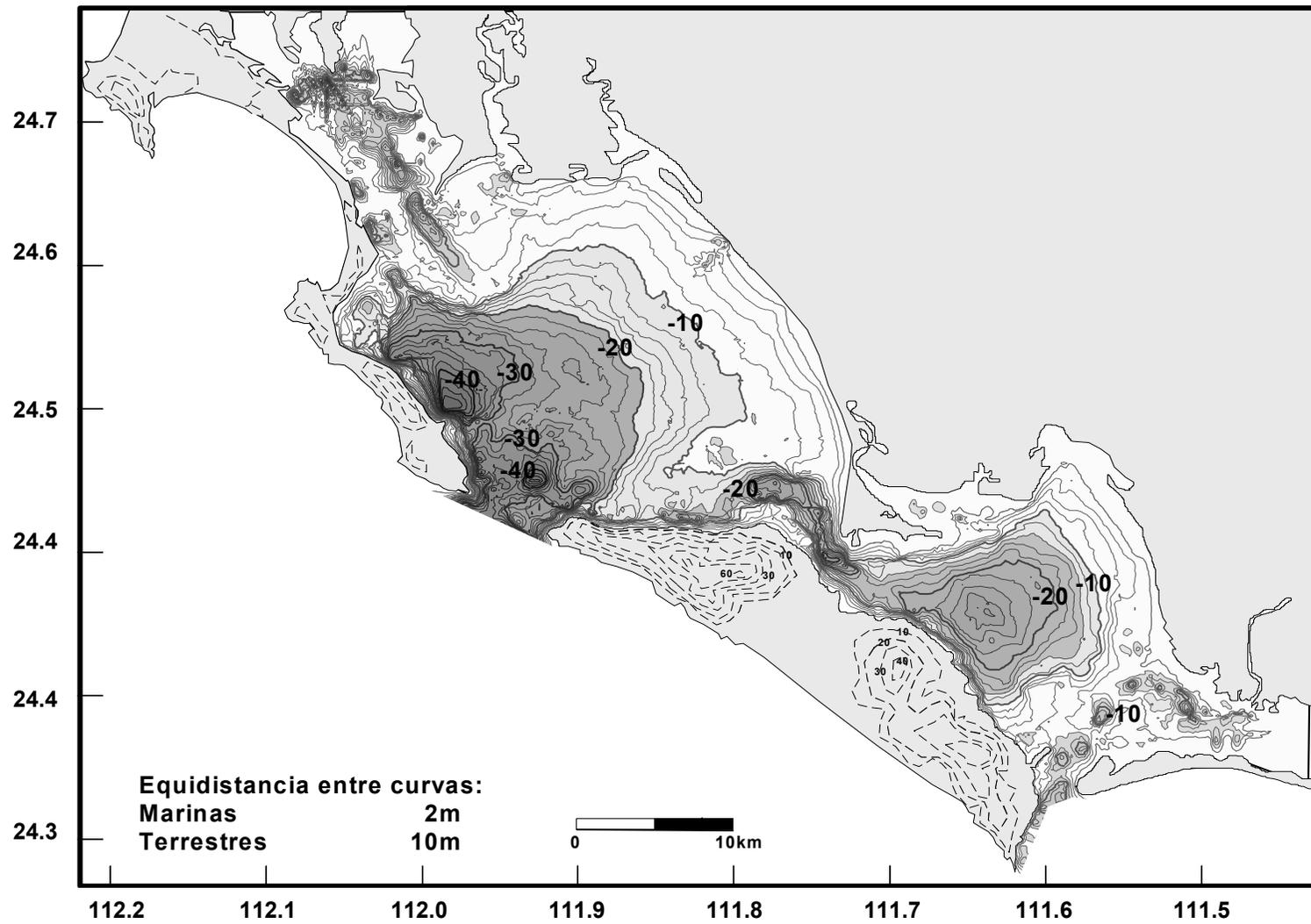


Fig. 2. Mapa batimétrico del complejo lagunar Bahía Magdalena-Almejas (Cortesía de Murillo Jiménez, 2006)

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Trabajo de Campo

Los muestreos fueron divididos en dos etapas. La primera etapa consistió en realizar ciclos de 24 horas en la boca principal de la bahía, $24^{\circ} 57' N$ y $112^{\circ} 03' W$ (Fig. 3) en los meses diciembre del 2004, junio, agosto y noviembre del 2005. Durante cada dos horas se tomaron registros de temperatura y salinidad por medio de un CTD y muestras discretas de agua a profundidades de superficie (0.5 m), intermedia (15 m) y fondo (30 m), para análisis de oxígeno disuelto, nutrientes (amonio, nitritos, nitratos y fosfatos) y clorofila *a*. La segunda etapa consistió en realizar muestreos en una red de 14 estaciones ubicadas en el interior de la bahía (Fig. 3), durante ciertos días de los meses de enero, febrero, marzo, junio, agosto y noviembre del 2005. En este muestreo se tomaron muestras de agua superficial para el registro de temperatura y el análisis de los nutrientes (nitritos, nitratos y fosfatos) y clorofila *a*. El muestreo de diciembre del 2004 se realizó a bordo del buque oceanográfico "El Puma", utilizando una roseta con botellas Niskin de 5 L de capacidad, para la recolección de las muestras de agua. Los siguientes muestreos (a excepción de agosto del 2005) fueron realizados a bordo de una embarcación con motor fuera de borda. En agosto del 2005 se realizó el muestreo en una embarcación de la Capitanía de Puerto San Carlos.

Los datos de concentración del oxígeno disuelto en diciembre del 2004, se obtuvieron mediante un medidor continuo de oxígeno disuelto provisto de electrodos de vidrio, marca YSI modelo 58. Para el resto de los meses, las muestras de oxígeno disuelto se tomaron en botellas de DBO de 60 ml, utilizando una manguera para evitar

las burbujas y turbulencia en la muestra. Posteriormente, fueron fijadas con 0.8 ml de solución de manganeso (II) y 0.8 ml de solución alcalina, y colocadas en una caja resguardada de la luz. Las muestras de agua para nitritos, nitratos, fosfatos fueron filtradas a través de filtros GF/F de tamaño de poros de 25 mm de diámetro, y almacenadas en una botella de polietileno, que luego fueron colocadas en una hielera a 4 °C durante su transporte. En el laboratorio las muestras fueron congeladas a -50 °C hasta su posterior análisis químico. Las muestras de amonio fueron tomadas de la botella Niskin usando una jeringa de 20 ml provista de un sistema de filtración Millipore. Una vez filtradas, se colocaron en una botella de polietileno de 5 mL de capacidad e inmediatamente fueron introducidas en un contenedor con nitrógeno líquido, hasta su posterior análisis. Todo el proceso se realizó cuidadosamente evitando la contaminación. Para las muestras de clorofila *a* se filtraron 1.5 L de agua de mar a través de filtros GF/F de 25 mm de diámetro. Estos filtros fueron colocados en un contenedor de nitrógeno líquido para su traslado al laboratorio, luego fueron colocados en un congelador a -50 °C hasta su posterior análisis.

Los registros de temperatura y salinidad en el mes de diciembre del 2004 se hicieron con un CTD marca General Oceanics Mark III. Mientras que en el resto de los muestreo se registraron con un CTD marca SeaBird 19 Plus 25. Para la temperatura superficial en la red se utilizó un termómetro de cubeta (precisión de ± 0.1 °C).

Las estimaciones de la altura de la marea en el mes de diciembre del 2004 se obtuvieron a través de un programa tomado de la página Web [http: www. jtides.com](http://www.jtides.com), y en el resto de los meses fueron tomados de la página Web del CICESE: [http:](http://)

www.oceanografía.cicese.mx. Son predicciones de marea para el Puerto de San Carlos, B.C.S., (24 47 N, 112 07 W). Fuente de datos horarios: UMAN. Los datos del CTD fueron filtrados y procesados a través del programa CTD Profiles Preprocessing, (Makarov, 2006).

3.2. Trabajo de Laboratorio:

Los **Nitratos** se determinaron por el método de Morris y Riley (1963) (En Strickland y Parsons, 1972), con un intervalo de detección desde 0.05 a 45 μM y una precisión de $\pm 0.05 \mu\text{M}$; los **Nitritos** se midieron por el método de Bendschneider y Robinson (1952) (En Strickland y Parsons, 1972) con un intervalo de detección entre 0.01 a 2.5 μM y una precisión de $\pm 0.005 \mu\text{M}$. Los **Fosfatos** se midieron por el método de Murphy y Riley (1962) (En Strickland y Parsons, 1972) cuyo intervalo de detección que va desde 0.03 a 5.00 μM y una precisión de $\pm 0.03 \mu\text{M}$. **Amonio**: la técnica es una modificación del método fenol-hipoclorito de Solórzano (1969) (En Strickland y Parsons, 1972). Las curvas de calibración para cada mes se encuentran en los anexos. La **clorofila a** se determinó por el método de Jeffrey y Humphrey (1975) (En Strickland y Parsons, 1972) cuya precisión es de $\pm 0.01 \text{ mg}$. Las lecturas espectrofotométricas se hicieron en un espectrofotómetro Milton Roy 1201, utilizando celdas de 1 cm para nitratos y amonio, de 10 cm para nitritos y fosfatos, y de 5 cm para la clorofila a.

3.3. Tratamiento estadístico de los datos:

Los mapas de contornos se elaboraron con base en la integración de áreas por el método de interpolación conocido como *Kriging*, usando el programa Surfer (ver Golden 7.0. Software, 2000).

Los promedios y los intervalos de confianza al 95 % de la concentración de nutrientes y Cl a fueron elaborados con el programa Statistica versión 6.0.

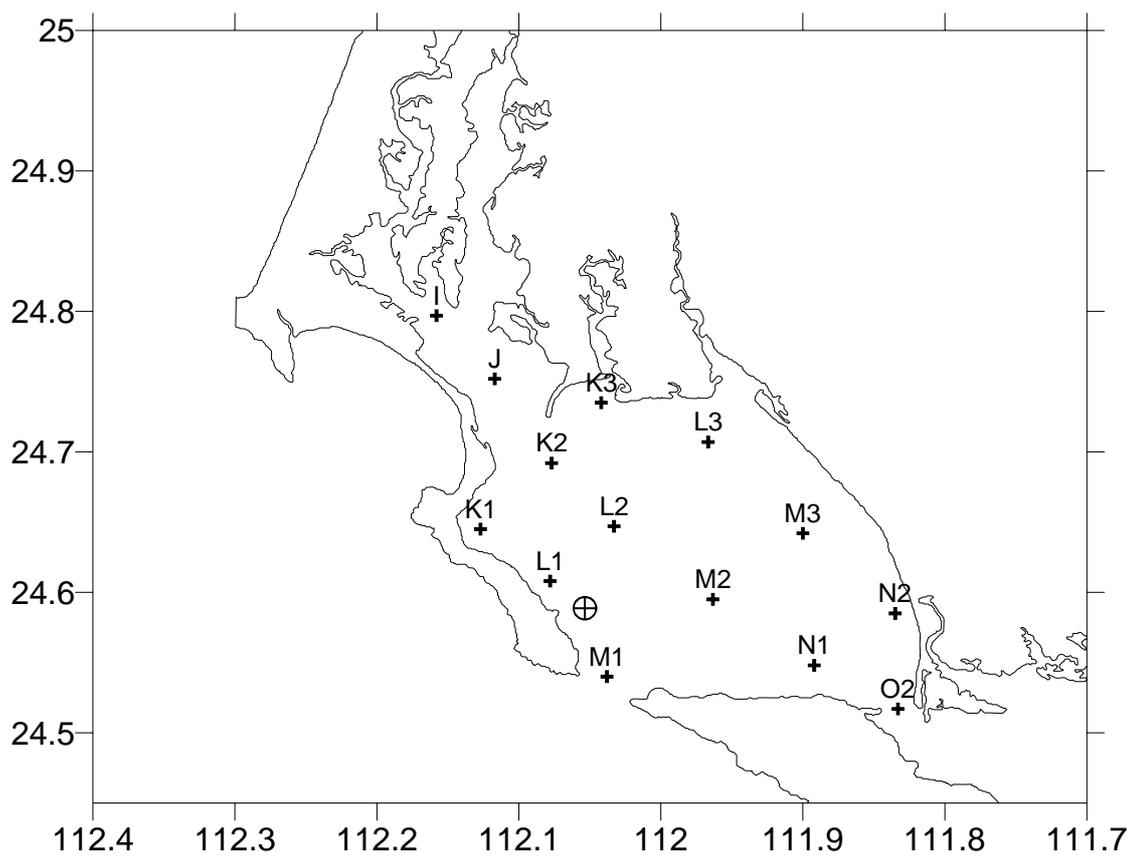


Fig. 3. Red de estaciones (+) y estación fija de muestreo en los ciclos de 24 horas (⊕)

4. RESULTADOS

4.1. CICLO NICTIMERAL

4.1.1. Condiciones de Marea (Nivel del mar)

Las variaciones horarias del nivel del mar durante los dos días de muestreos para cada mes, se muestran en las Figuras 4. En dichas figuras se puede apreciar como la marea durante el ciclo de 24 h y para cada mes presenta dos pleamares y dos bajamares de magnitudes diferentes. Además, los reflujos son de mayor intensidad que los flujos, especialmente durante las fases de mareas vivas (agosto y noviembre del 2005).

La Tabla 1 muestra que la amplitud máxima de la marea se presentó durante la marea del mes de agosto del 2005 (2.5 m) y el mínimo durante el mes de diciembre del 2004 (1.8 m). Es importante indicar que existe un retraso de 20 min de la onda de marea entre la bocana (estación de muestreo) y el Puerto San Carlos (Sánchez-Montante, 2004), sin embargo no se considera significativo en este estudio.

Tabla 1. Amplitud de la marea en diferentes condiciones de marea para cada mes de muestreo (Fuente de datos horarios: www.oceanografía.cicese.mx)

Mes	Tipo de Marea	Amplitud (m)
Diciembre	Muerta	1.8
Junio	Muerta	2.1
Agosto	Viva	2.5
Noviembre	Viva	2.3

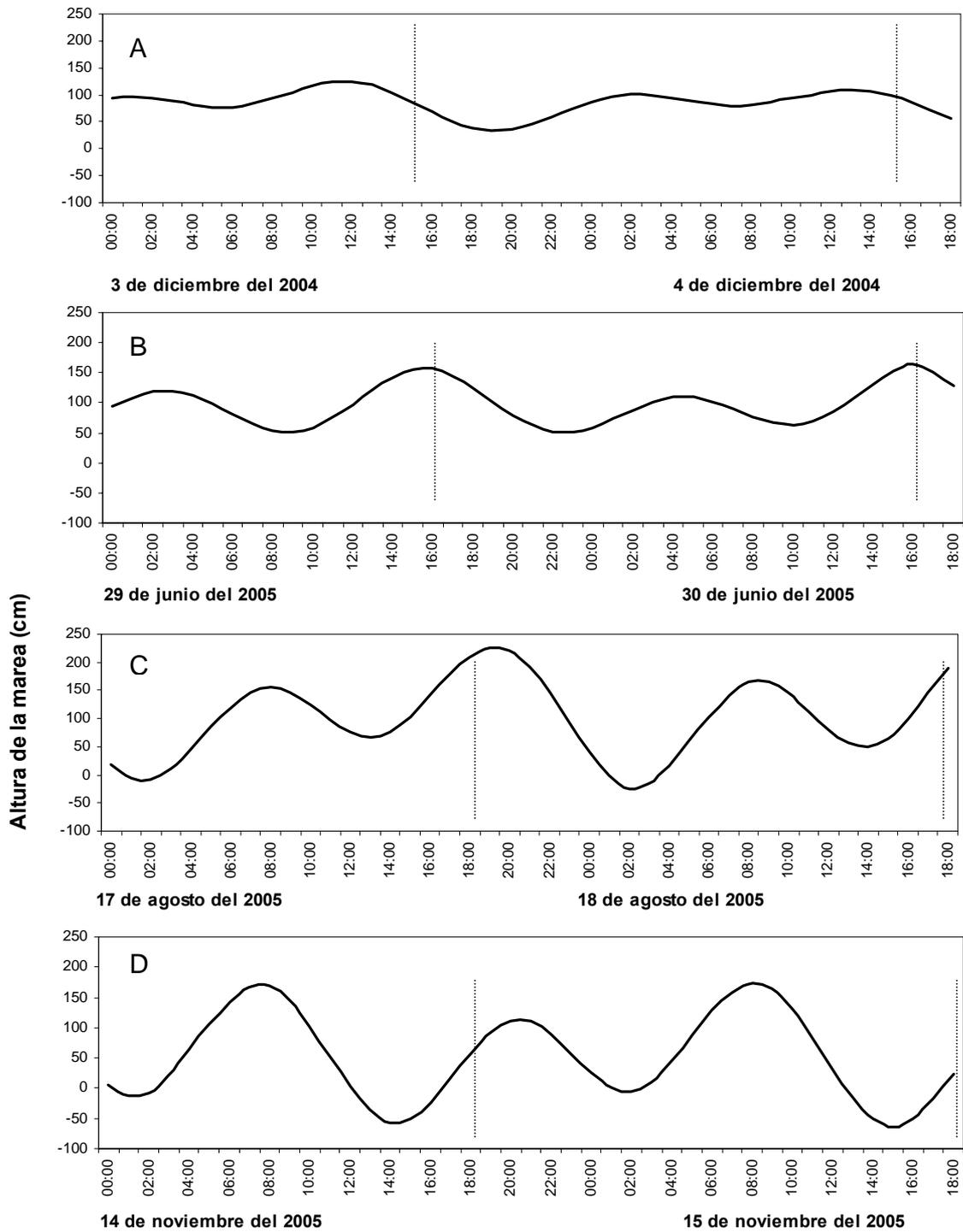


Fig. 4. Altura de la marea en los meses de diciembre del 2004 (A), junio (B), agosto (C) y noviembre del 2005 (D). Las líneas verticales punteadas delimitan el periodo de muestreo.

4.1.2. Características termohalinas y oxigenación de la columna de agua.

Para estudiar los cambios nictimerales y estacionales ocurridos en la estructura termohalina de la columna de agua en la estación de muestreo (Fig. 1) se analizaron las variables en función de su distribución vertical y la fase de la marea.

Temperatura y Salinidad

La temperatura y la salinidad presentaron patrones de comportamiento diferentes en los días elegidos de los cuatros meses de muestreos, debido a que la columna de agua exhibió características que van desde aguas mezcladas en invierno (diciembre del 2004) hasta aguas completamente estratificadas (Fig. 5 a la Fig. 8).

Como se ve en la Figura 5, las condiciones térmicas de la columna de agua de diciembre del 2004 fueron muy uniformes, con diferencias de temperatura < 1 °C entre las aguas superficiales y de fondo. El intervalo de temperatura de la columna de agua estuvo comprendido entre 21.0 y 21.9 °C. Esto indica que se presentaron condiciones de mezcla vertical a lo largo del ciclo nictimeral en mareas muerstas. En el caso de la salinidad y de sigma-t los rangos estuvieron entre (34.2 y 34.5 ups) y (23.7 y 24.1 Kg/m³), respectivamente. Sin embargo, generalmente se observaron valores ligeramente más altos en las aguas de fondo. Las variaciones de temperatura, salinidad y densidad no mostraron relación con las condiciones de marea que se presentaron durante el ciclo.

En el mes de junio del 2005 (Fig.6) la temperatura presentó una mayor variabilidad que en el mes de diciembre del 2004, durante el ciclo de muestreo, con temperaturas mínimas de 15.8 °C y máximas de 22.3 °C. Al inicio del ciclo la columna

de agua se encontraba mezclada con temperaturas cercanas a 20.7 °C, y luego a partir de las 21 h la temperatura de la columna de agua descendió abruptamente durante las horas de la noche y luego volvió a aumentar en las horas del día. En los perfiles verticales se puede apreciar más claro, como la capa de agua superficial se enfrió de las 19 a las 03 h. El resto de las capas de la columna de agua siguió la misma tendencia mencionada anteriormente, pero con diferencias menores en los rangos.

La salinidad en junio del 2005 no presentó tanta variabilidad como la temperatura. Sin embargo, se observaron aguas superficiales menos salinas durante el periodo de enfriamiento. La capa de agua superficial presentó mayor variabilidad en los valores de salinidades (33.9 a 34.35 ups), que el resto de las capas que permanecieron con poca variación a lo largo del ciclo (cercana a 34.3 ups). Sigma-t al igual que la temperatura registró un amplio intervalo que van desde 23.6 a 25.2 Kg/m³ durante el ciclo nictimeral en la columna de agua. Las pequeñas diferencias observadas entre las capas verticales de agua, hacen suponer condiciones de poca estratificación. De nuevo no se observó relación entre la variabilidad de la temperatura, la salinidad y sigma-t con la altura de la marea. En el mes de agosto del 2005 (Fig.7) la columna de agua presentó estratificación en todo el ciclo, excepto de 06 a 08 h que se presentaron condiciones de mezcla. La temperatura en todos sus niveles, con menor influencia en el fondo, estuvo influenciada por las fases de la marea (Fig.7) con alta estratificación en bajamar y capa de mezcla en la pleamar haciéndose evidente las diferencias encontradas entre las aguas superficiales y de fondo con respecto al flujo y el reflujó de la marea. Durante el reflujó se observó un pequeño aumento de la temperatura en las aguas superficiales (aguas más calidas que salen de la bahía) que luego disminuye en

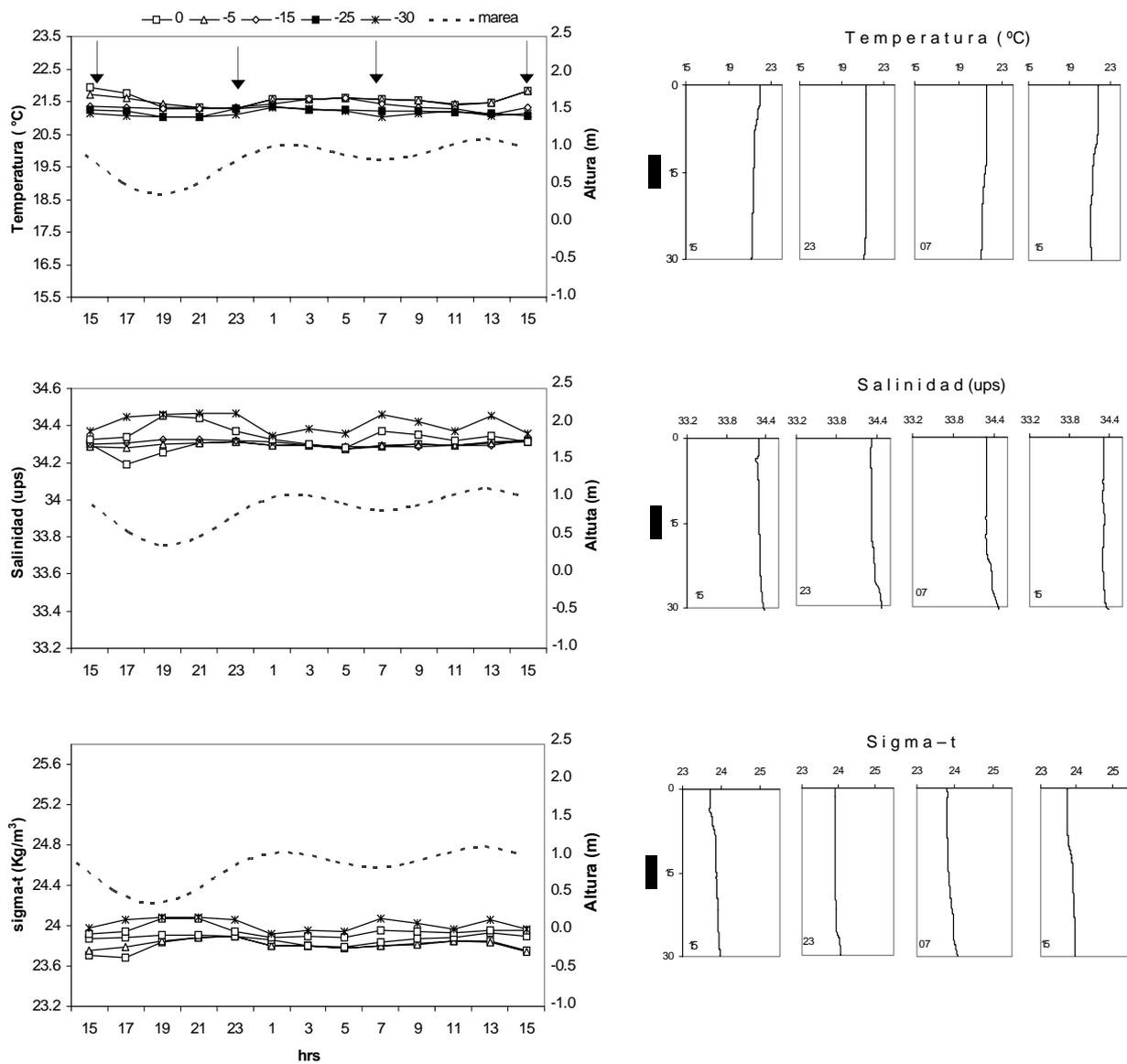


Fig. 5. Variabilidad temporal de temperatura, salinidad y densidad en la columna de agua durante el ciclo nictimera de diciembre del 2004. Las flechas indican las horas de los perfiles verticales seleccionados.

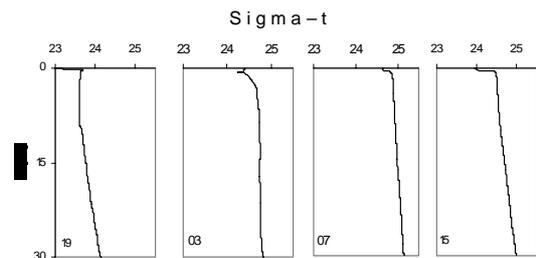
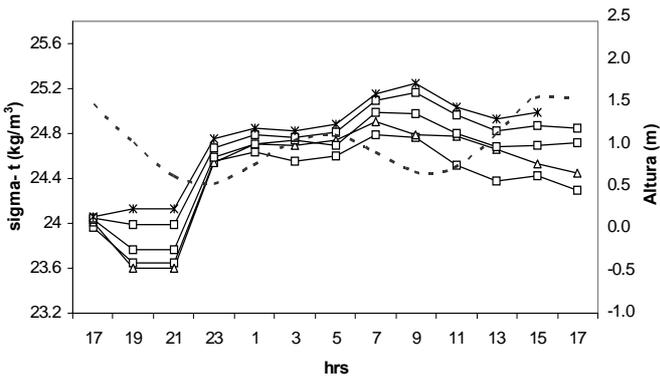
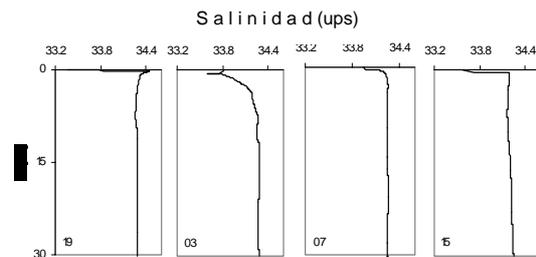
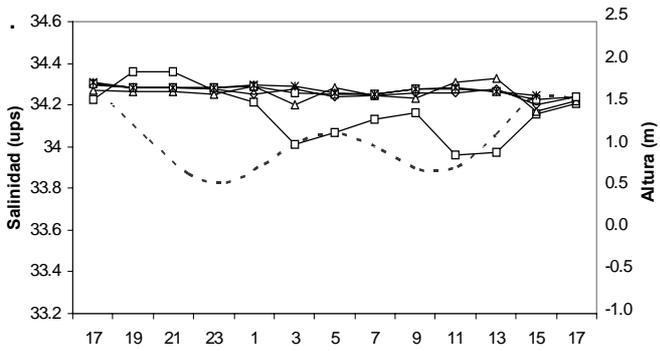
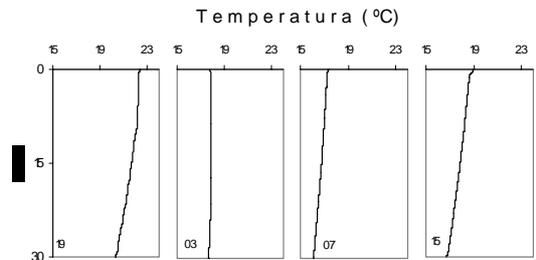
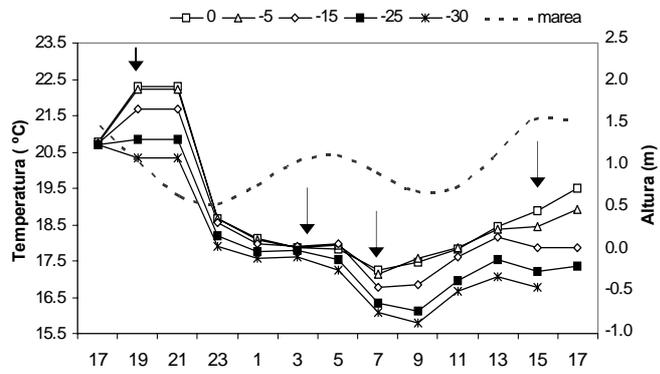


Fig. 6. Variabilidad temporal de temperatura, salinidad y densidad en la columna de agua durante el ciclo nictimera de junio del 2005. Las flechas indican las horas de los perfiles verticales seleccionadas.

fase de flujo (aguas frías que entran a la bahía de la plataforma continental). Las aguas de fondo por su parte no mostraron un patrón bien definido con respecto a la marea. El intervalo de salinidad de la columna de agua estuvo comprendido entre 34.0 y 34.4 ups, y los valores de salinidad fueron casi constantes en todas las horas del ciclo, a excepción de las 06 y 08 h donde se presentaron los valores mínimos de salinidad. A diferencia de la temperatura, la salinidad en las aguas superficiales y de fondo permaneció homogénea durante todo el ciclo. El comportamiento de sigma-t en el mes de agosto del 2005, hace evidente las condiciones de estratificación antes señaladas en el análisis de la temperatura. En la Figura 7 podemos notar como las aguas menos densas correspondientes a las aguas superficiales tienen una relación inversa con la altura de la marea.

En noviembre del 2005 la columna de agua presentó condiciones de estratificación intensa durante todo el ciclo (Fig. 8); con termoclinas muy cambiantes en periodos cortos de tiempos. En el estrato superficial la temperatura estuvo cercana a los 20.7 °C y en las aguas de fondo cercanas a 16.3 °C. Por su parte, las salinidades registradas en este mes fueron las más bajas, comparadas con los otros meses (33.6 y 33.7 ups) y fueron homogéneamente distribuidas en la columna de agua durante el ciclo de muestreo. El rango de sigma-t en la columna de agua para el mes de noviembre fue entre 23.6 y 24.7 Kg/m³, observándose aguas más densas en el fondo. Asimismo, se puede observar que la altura de la marea registradas para este mes, no muestran una relación simple con la densidad.

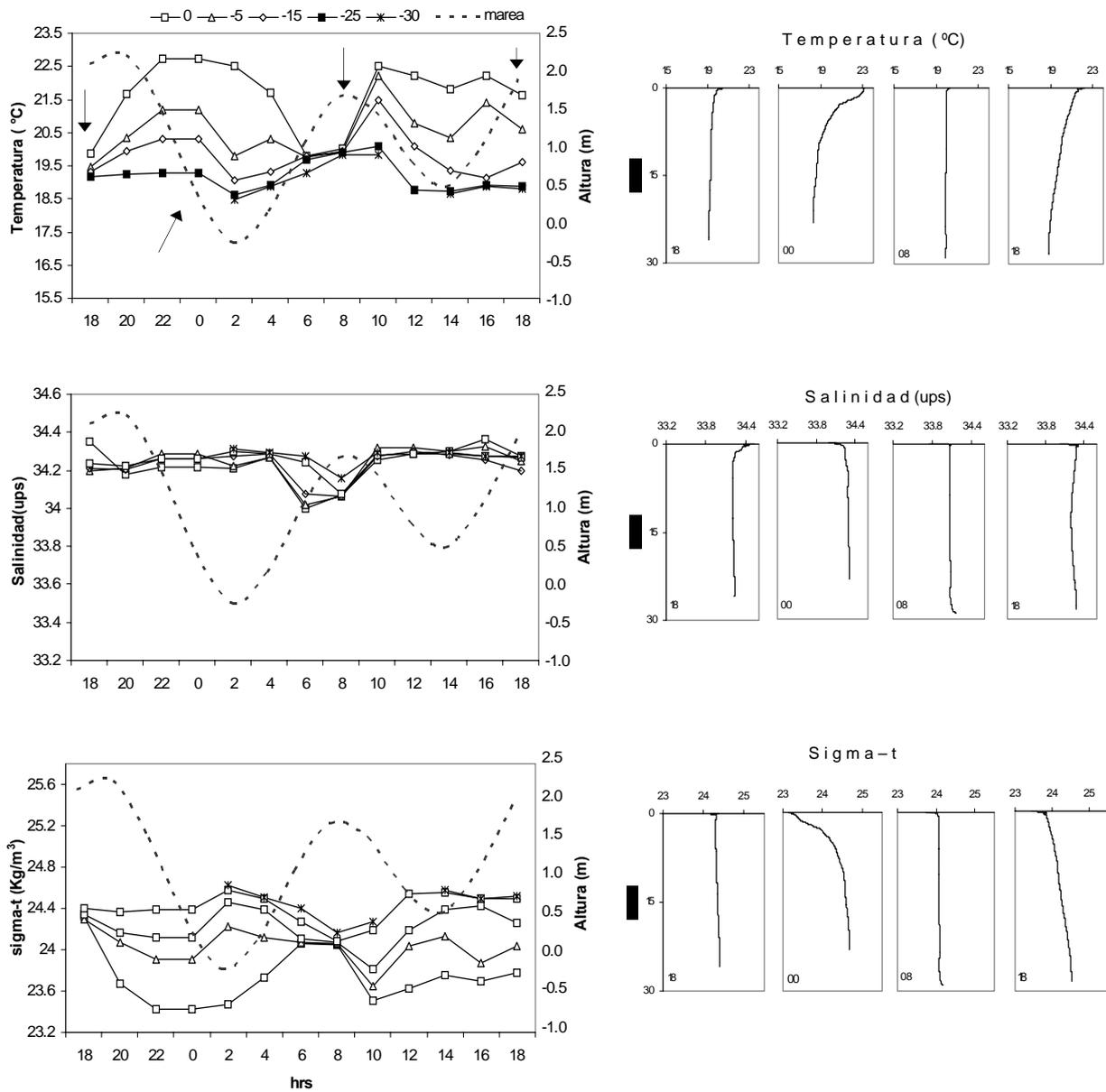


Fig. 7. Variabilidad temporal de temperatura, salinidad y densidad en la columna de agua durante el ciclo nictimeral de agosto del 2005. Las flechas indican las horas de los perfiles verticales seleccionadas.

Oxigenación de la columna de agua:

La distribución del oxígeno disuelto en la columna de agua y su variabilidad temporal se presentan en la Figura 9. En el mes de diciembre del 2004 el intervalo de oxígeno disuelto en la columna de agua durante el ciclo estuvo comprendido entre 4.34 y 9.76 ml/L. Las concentraciones del oxígeno disuelto en la columna de agua se mantienen uniformes a lo largo de todo el ciclo, excepto el valor registrado a las 03 hrs en la superficie; concordando con las condiciones de mezcla antes mencionadas para este mes. No hay relación aparente entre la marea y el oxígeno. Además, no se observa un patrón ni con las horas del día ni de la noche (Fig. 9 a).

En el mes de junio del 2005, el oxígeno disuelto en la columna de agua sigue el patrón característico de distribución de aguas estratificadas; es decir, las concentraciones en la capa superficial, intermedia y fondo son apreciablemente diferentes (Fig. 9 b). En este mes, los valores más altos se presentaron en el estrato superficial los cuales oscilaron entre 4.59 y 6.69 ml/L, mientras que los valores más bajos se registraron en las aguas de fondo, con concentraciones entre 1.34 y 2.5 ml/L. Se observa que durante el ciclo de muestreo la capa intermedia y fondo siguen una misma tendencia.

En la figura se aprecia que durante el refluo en marea muerta el contenido de oxígeno disuelto en el estrato superficial disminuye (con máximos en la bajamar y mínimos en la pleamar). Mientras en las aguas intermedias y fondo durante esta fase aumentó la concentración de oxígeno, con máximos en la pleamar y mínimos en la bajamar (Fig. 9 b).

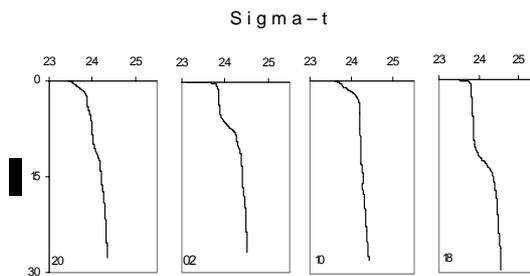
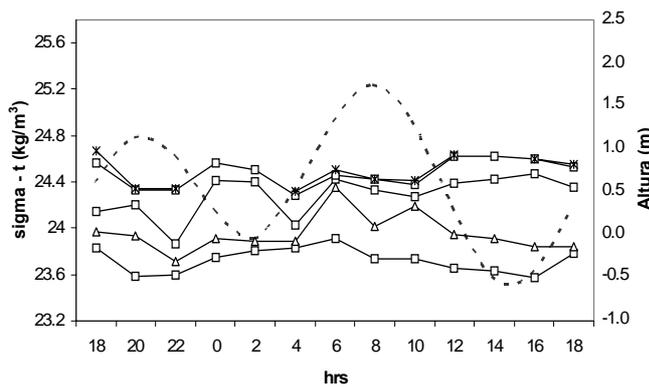
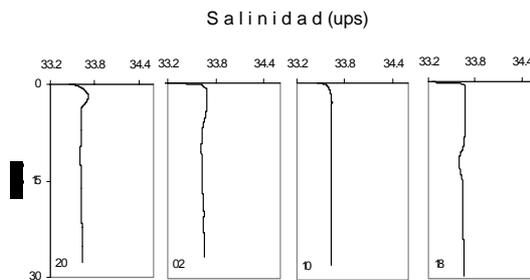
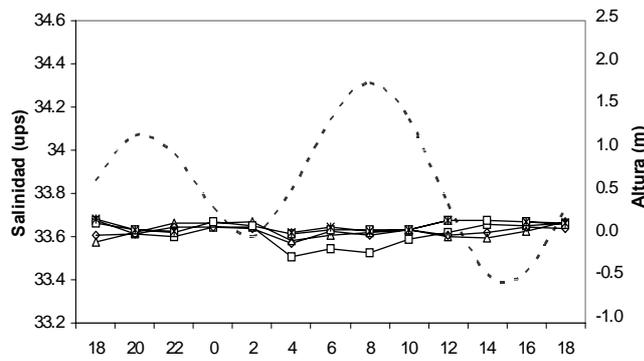
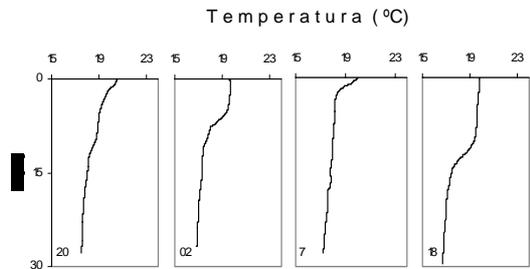
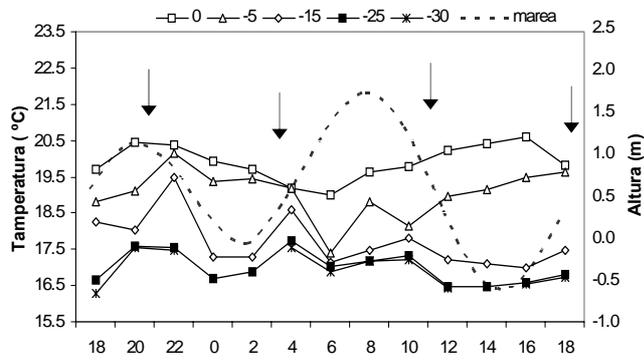


Fig. 8. Variabilidad temporal de temperatura, salinidad y densidad en la columna de agua durante el ciclo nictimera de noviembre del 2005. Las flechas indican las horas de los perfiles verticales seleccionadas.

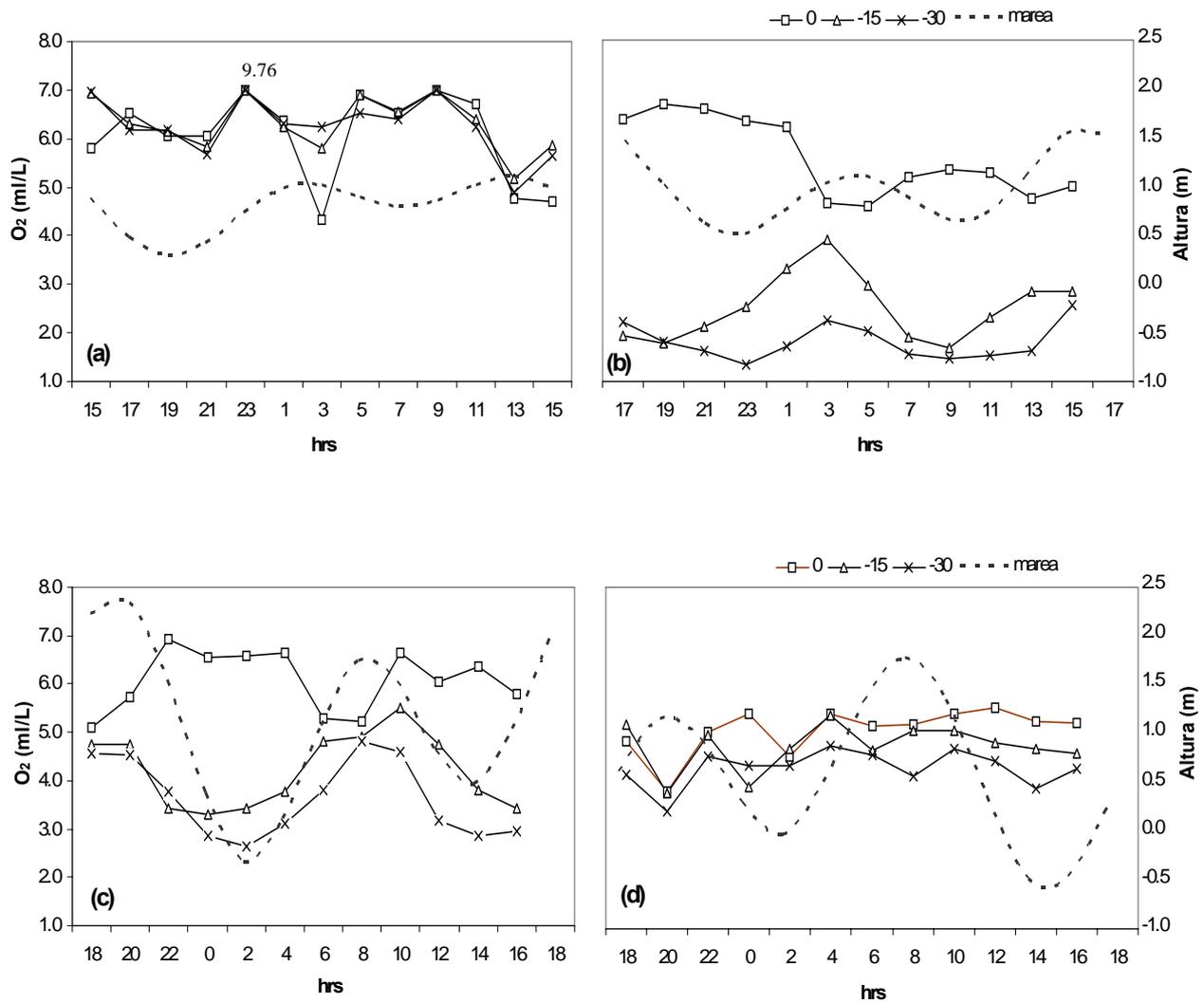


Fig. 9. Variabilidad temporal del O_2 en la columna de agua durante el ciclo en el mes de diciembre del 2004 (a), junio del 2005 (b), agosto del 2005 (c) y noviembre del 2005 (d).

En agosto del 2005 (Fig.9 c) la distribución y variabilidad del oxígeno en la columna de agua durante el ciclo fue muy semejante al mes de junio del 2005; siendo evidente la relación del oxígeno disuelto con la mareas. El rango del oxígeno estuvo entre 5.11 – 6.94 ml/L y el contenido de oxígeno máximo se registró durante el reflujó. Contrariamente, las aguas intermedias (3.29 – 5.51 ml/L) y fondo (2.64 – 4.83 ml/L) se acoplaron a la onda de marea, disminuyendo en el reflujó.

En noviembre del 2005 (Fig. 9 d) no existió una diferencia notable en el contenido de oxígeno entre las aguas superficiales, intermedias y fondo. Las diferencias entre cada estrato fueron más evidentes durante la pleamar y la bajamar (Fig. 9 d). En este mes el intervalo estuvo comprendido entre 3.41 y 5.53 ml/L.

4.1.3. Variabilidad temporal de las concentraciones de los nutrientes.

En general, los nutrientes presentaron un patrón de comportamiento similar a la temperatura, salinidad y oxígeno disuelto. Las menores concentraciones de nutrientes estuvieron registradas en diciembre del 2004 asociadas con el hundimiento de la nutriclina, reflejada en una gruesa capa de mezcla cálida y las mayores en junio del 2005 con una estratificación cerca de la superficie. En las Figuras de la 10 - 13 se muestran la distribución y variabilidad de los nutrientes en la columna de agua en cada mes, durante el ciclo de muestreo. La Tabla 2 muestra las concentraciones máximas y mínimas registradas en superficie, a profundidad intermedia (15 m) y de fondo (30m), durante los meses de muestreo.

Tabla I. Intervalo de concentración y promedio de nutrientes en los meses de muestreo

Mes	NH ₄ ⁺ (μM)									NO ₂ ⁻ (μM)								
	Superficie			Intermedio			Fondo			Superficie			Intermedio			Fondo		
	min	max	\bar{X}	min	max	\bar{X}	min	max	\bar{X}	min	max	\bar{X}	min	max	\bar{X}	min	max	\bar{X}
Dic.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01	0.07	0.04	0.03	0.09	0.06	0.02	0.09	0.05
Jun.	nd	2.24	0.73	nd	1.96	0.86	0.55	3.30	1.76	0.01	0.56	0.02	0.53	1.09	0.74	0.55	1.04	0.89
Ag.	nd	1.10	0.34	nd	2.13	0.96	nd	5.79	1.90	0.02	0.33	0.14	0.11	0.97	0.50	0.33	1.27	0.87
Nov.	0.58	1.04	0.77	0.38	1.17	0.75	0.58	1.51	0.86	0.01	0.26	0.06	0.08	0.28	0.18	nd	0.26	0.20
Mes	NO ₃ ⁻ (μM)									PO ₄ ³⁻ (μM)								
	Superficie			Intermedio			Fondo			Superficie			Intermedio			Fondo		
	min	max	\bar{X}	min	max	\bar{X}	min	max	\bar{X}	min	max	\bar{X}	min	max	\bar{X}	min	max	\bar{X}
Dic.	0.05	2.19	0.74	0.12	2.85	0.74	0.26	2.75	0.91	0.16	0.52	0.34	0.10	0.62	0.39	0.33	0.66	0.49
Jun.	0.69	10.2	3.93	9.64	21.3	14.17	7.59	21.63	17.1	0.56	1.63	0.93	1.54	2.35	1.95	0.91	2.00	1.53
Ag.	0.26	4.00	1.58	1.08	6.71	3.46	2.24	12.0	6.07	0.31	1.03	0.61	0.65	1.61	1.19	0.91	2.00	1.53
Nov.	0.16	5.54	1.42	1.11	3.99	2.65	0.62	9.59	4.77	0.31	0.85	0.50	0.39	0.77	0.62	0.38	0.95	0.78

(-): no valores

nd : no detectados

La distribución de nutrientes en la columna de agua en diciembre del 2004 (Fig. 10), fueron similares en las tres profundidades (0 ,15 y 30 m), causados por las condiciones de mezcla. El intervalo de concentración durante las 24 horas del muestreo para los nitritos, nitratos y fosfatos estuvo entre 0.01 y 0.09 μM, 0.05 y 2.85 μM, 0.66 y 0.10 μM, respectivamente. La altura de la marea no tuvo una relación evidente con la distribución y variabilidad de los nutrientes (Fig. 10). En junio del 2005 las concentraciones de los nutrientes se incrementaron con respecto al mes de diciembre del 2004 (Tabla 2). Además, fueron evidentes las diferencias de concentración de nutrientes en los tres niveles de profundidad. En la Figura 11 se puede apreciar que a lo

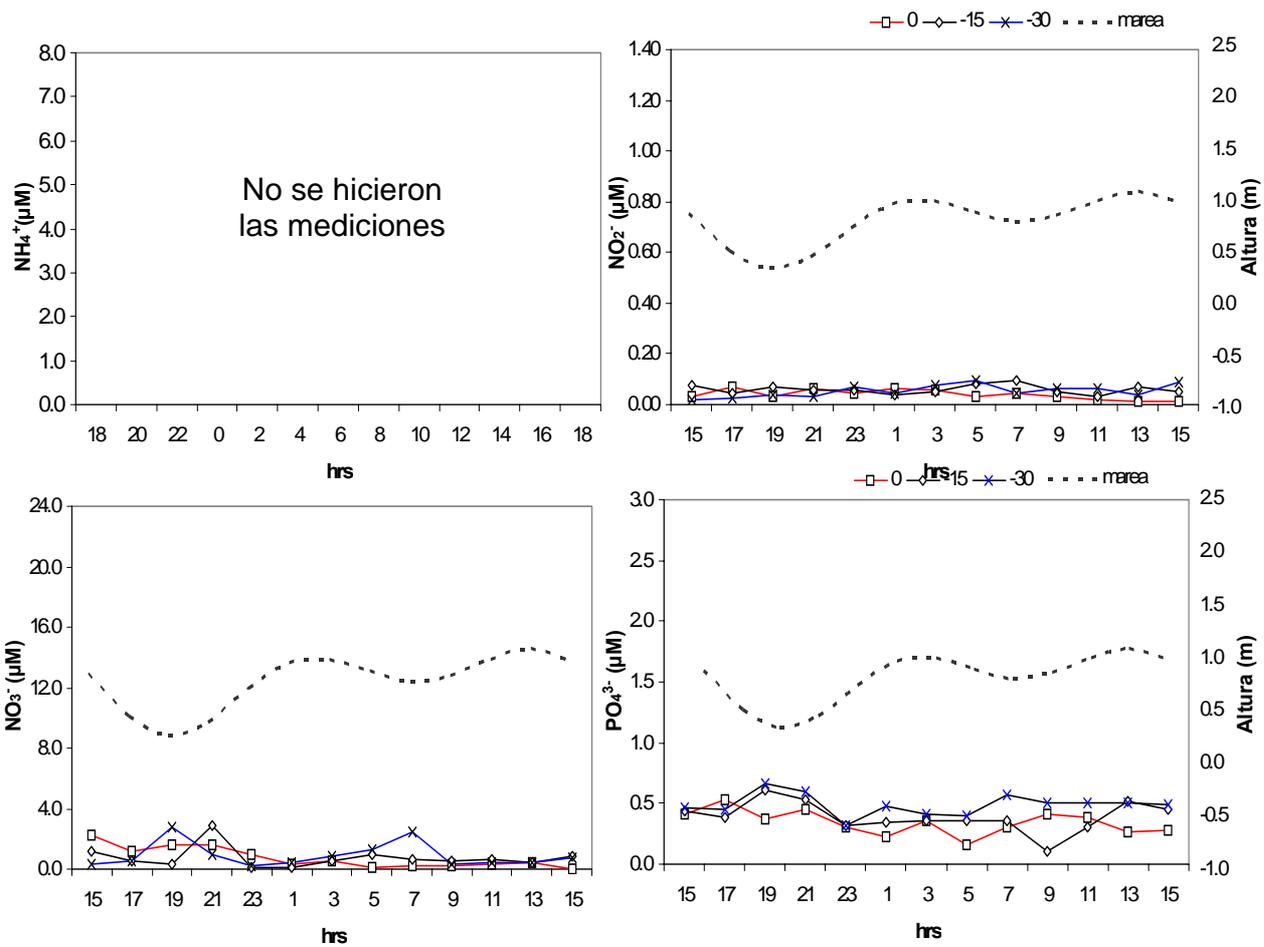


Fig. 10. Variabilidad temporal de nitritos, nitratos, fosfatos y altura de la marea en diciembre del 2004. En este mes no se hicieron mediciones de amonio.

largo del ciclo los valores más bajos de los nutrientes se registraron en la superficie y los más altos en el fondo. Además se aprecia que en el estrato superficial los valores más bajos fueron registrados desde las 17 hrs hasta las 03 hrs; luego se observa un aumento progresivo de las concentraciones. Sin embargo, el amonio durante algunas horas del ciclo no siguió este patrón. El intervalo de concentración general de amonio estuvo entre valores no detectados en superficie hasta 3.30 μM en aguas de fondo (Tabla 2). Asimismo, y aunque este nutriente presentó mucha variabilidad durante el ciclo nictimeral, tiene cierta relación con las fases de la marea. Durante el reflujó las concentraciones de amonio en la superficie y en el fondo tienden a disminuir, y durante el flujo tienden a aumentar. Son notables los máximos ($\sim 3 \mu\text{M}$) registrados en la superficie durante un corto periodo, entre las 3 y las 5 h del ciclo nictimeral.

La distribución de los nutrientes en la columna de agua en agosto del 2005 fue un tanto similar al encontrado en el mes de junio del 2005 (Fig. 12), donde la estratificación de la columna de agua parece jugar un papel muy importante en la distribución vertical de nutrientes. Las concentraciones de nitratos y fosfatos fueron proporcionalmente más bajas que en el mes anterior (Tabla 2). Además, la variabilidad de los nutrientes estuvo fuertemente influenciada con las condiciones de la marea. La variabilidad de los nutrientes en aguas superficiales presentó un patrón similar a la altura de la marea (Fig. 12). En general, se observa que las aguas superficiales que salen de la bahía tienen concentraciones bajas de nutrientes. Cuando se trata de aguas intermedias y de fondo, el patrón de variabilidad es totalmente opuesto a la marea. En general, los máximos de nutrientes se presentaron en bajamar y los mínimos en pleamar.

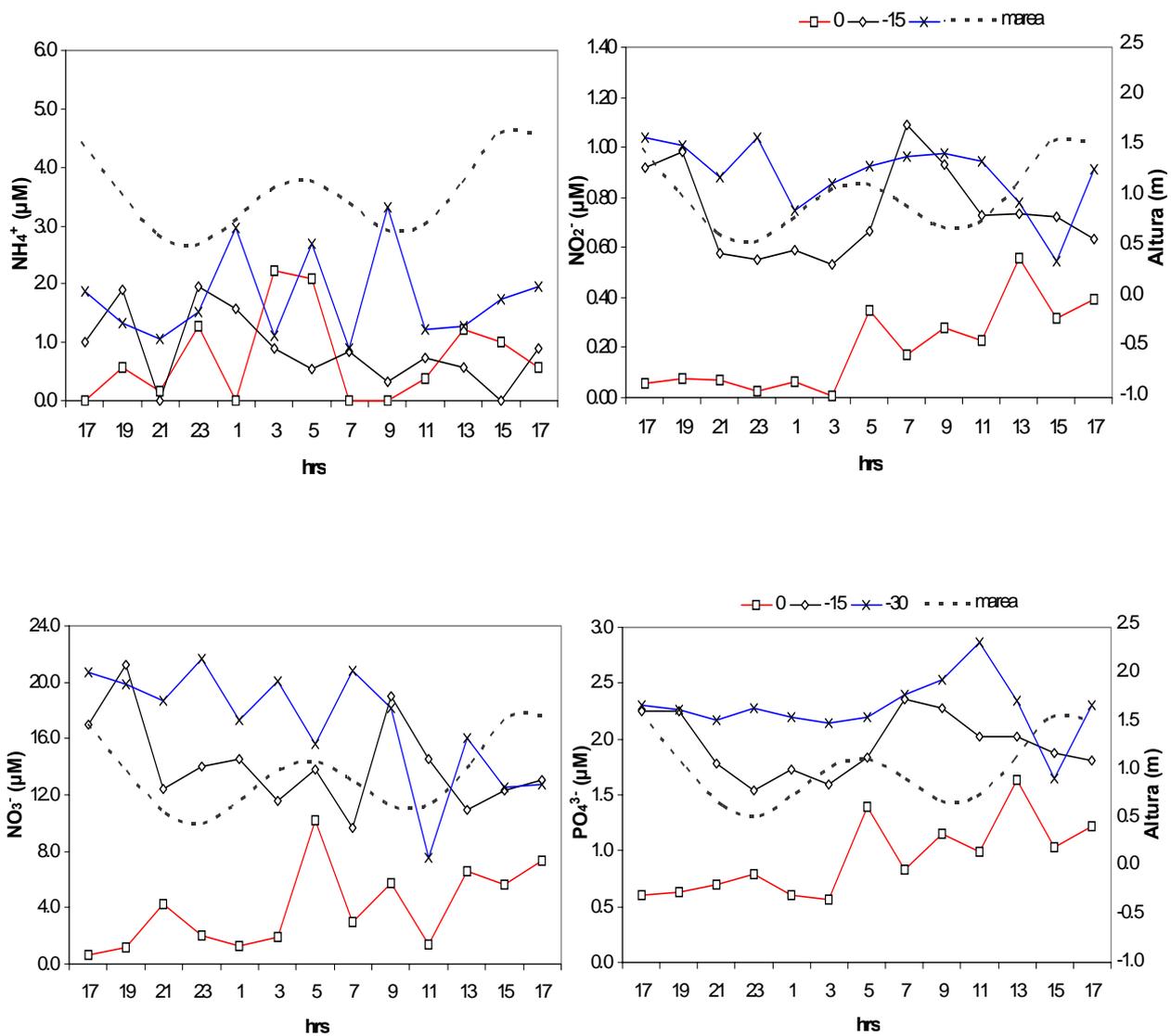


Fig. 11. Variabilidad temporal de amonio, nitritos, nitratos, fosfatos y altura de la marea en el mes de junio del 2005.

En noviembre del 2005 las concentraciones de los nutrientes son bajas (Fig. 13), aunque no las mínimos del periodo de estudio (Tabla 2), y a excepción del nitrito, las diferencias de concentración de nutrientes encontradas en las aguas superficiales, intermedias y de fondo no fueron muy diferentes. En la tabla se puede observar que los rangos obtenidos para nutrientes fueron estrechos. Por su parte, a pesar de su variabilidad, la distribución de amonio fue muy uniforme en la columna de agua. La variabilidad de los nutrientes con la marea, se puede notar cierta relación, especialmente en la bajamar donde los nutrientes tienden a incrementarse.

4.1.4. Clorofila a

En junio del 2005 los valores más altos se presentaron en el estrato superficial, los cuales fluctuaron entre 1.73 y 7.50 mg/m³. Es importante señalar que los valores máximos se registraron de las 21 a las 01 h. Por su parte, las aguas de fondo registraron los valores de Cl a más bajos, entre 0.63 y 1.56 mg/m³. Las aguas intermedias generalmente tienen un contenido de Cl a ligeramente más alto que las aguas de fondo. En el refluo la concentración de Cl a en la superficie aumenta (con máximos en la bajamar y mínimos en la pleamar) y en la fase de flujo tiende a disminuir (Fig.14 b).

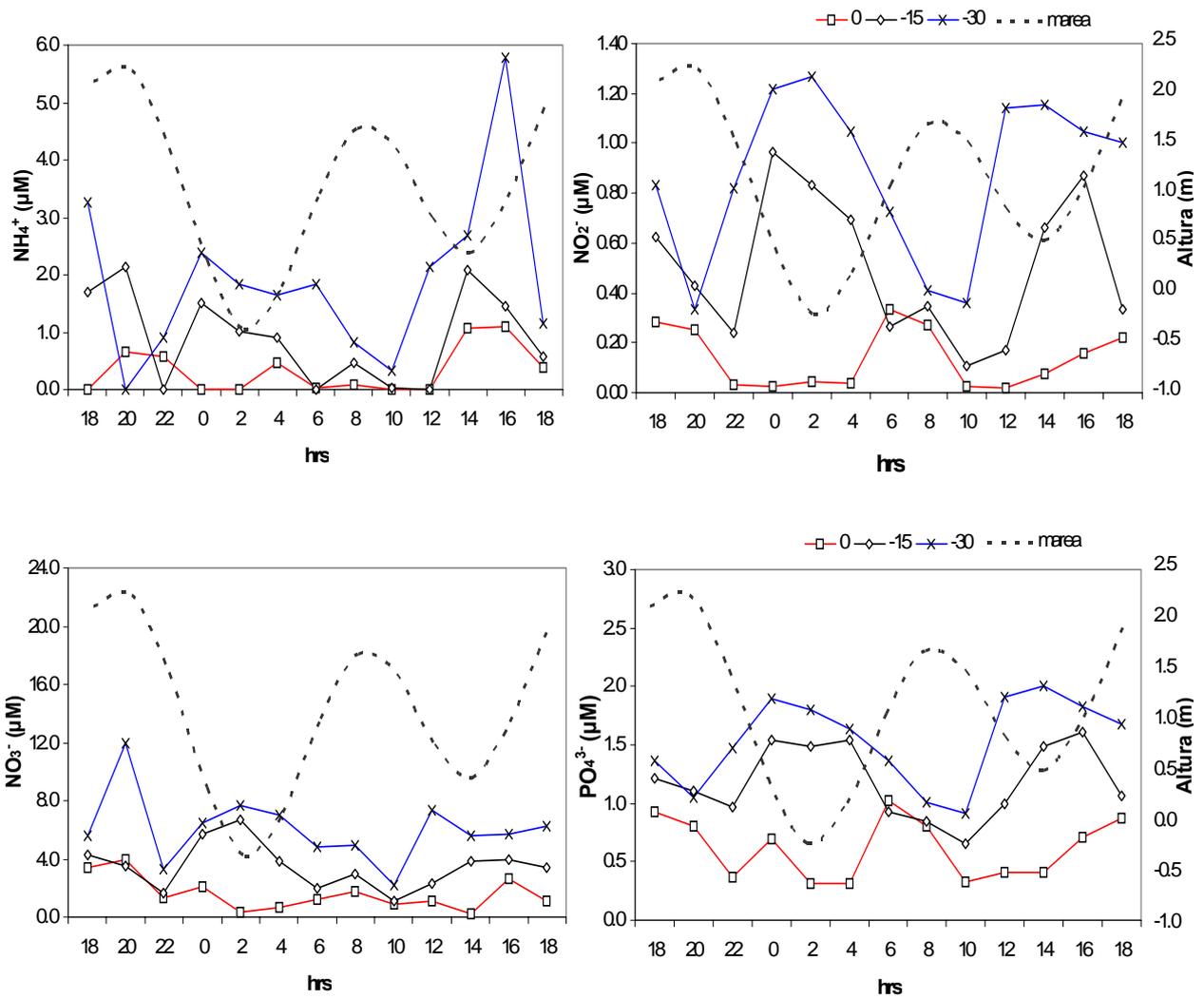


Fig. 12. Variabilidad temporal de amonio, nitritos, nitratos, fosfatos y altura de la marea en el mes de agosto del 2005.

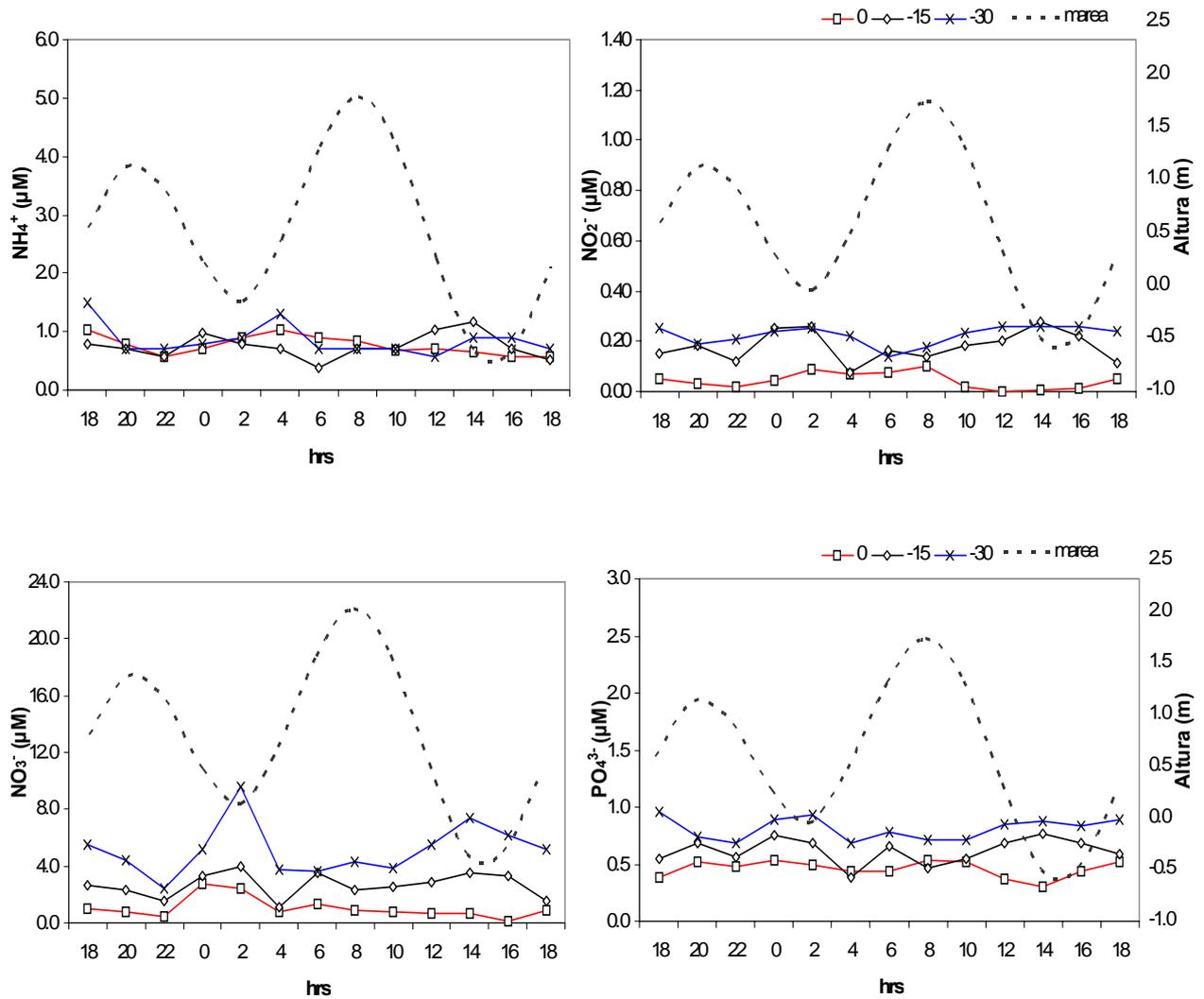


Fig. 5. Variabilidad temporal de amonio, nitritos, nitratos, fosfatos y altura de la marea en el mes de noviembre del 2005.

En agosto del 2005 la Cl_a se comportó diferente a junio; y su distribución no siguió un patrón similar a las características antes señalada de la columna de agua. La concentración de Cl_a en la superficie (1.36 y 4.45 mg/m^3) y en el fondo (1.12 y 3.65 mg/m^3) son muy similares. No obstante, el contenido de Cl_a en las aguas intermedias fue más alto, y con un máximo de 7.0 mg/m^3 a las 12 h (Fig. 14 c). La relación de la Cl_a con la marea no es clara, sin embargo, se pueden apreciar ligeros aumentos con respecto a la fase de flujo.

En cuanto a noviembre la distribución y variabilidad de la Cl_a fue uniforme en la columna de agua a lo largo del ciclo. El intervalo general registrado fue uno de los más bajos comparados con los otros meses y estuvo comprendido entre 0.87 y 2.95 mg/m^3 . No existe relación entre la marea y la Cl_a en este mes.

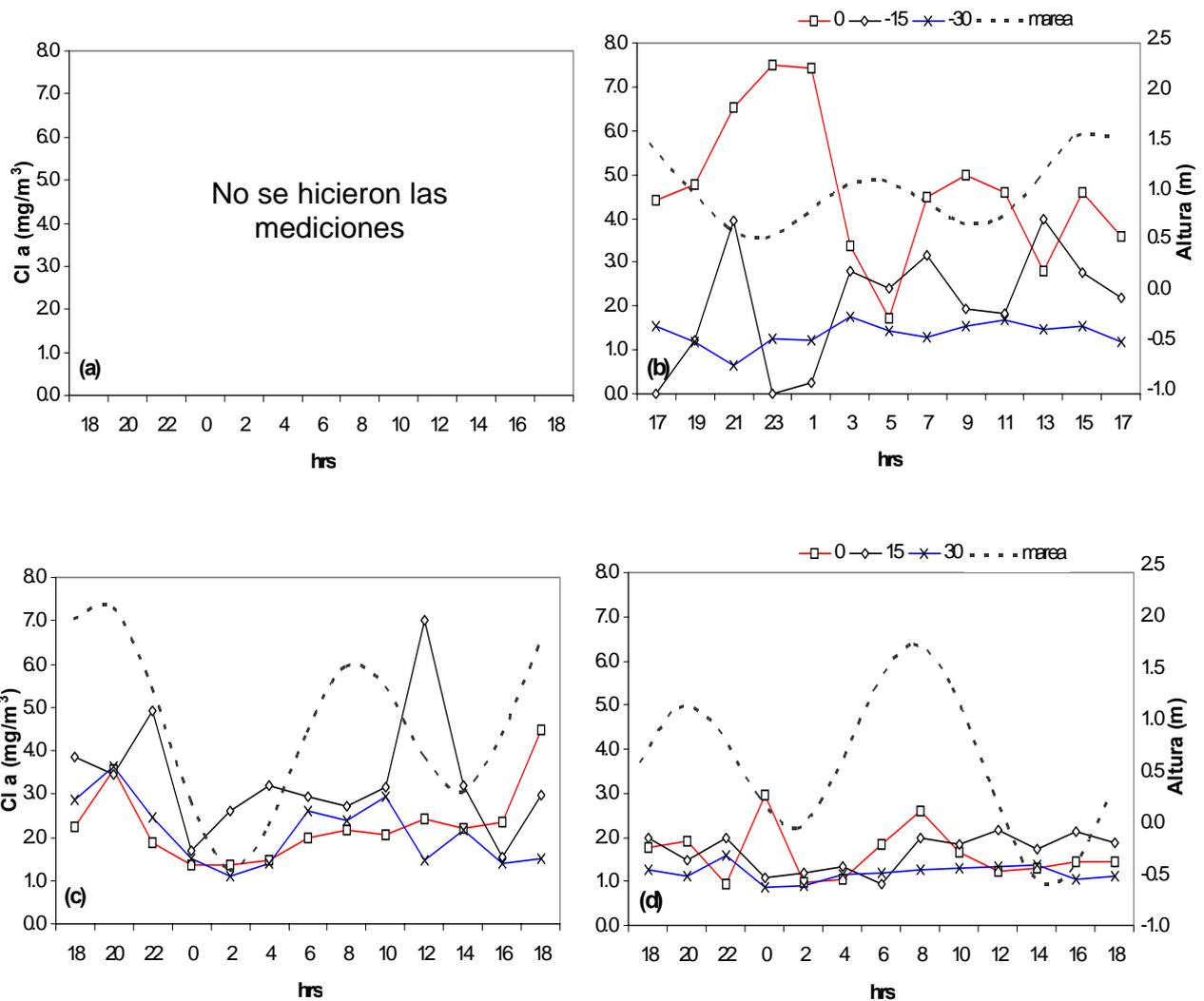


Fig. 6. Variabilidad temporal de Cl a en la columna de agua durante el ciclo en el mes de junio del 2005 (b), agosto del 2005 (c) y noviembre del 2005 (d). En diciembre del 2004 no se hicieron mediciones de Cl a.

4.2. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS VARIABLES HIDROGRÁFICAS EN LAS AGUAS SUPERFICIALES DE BAHÍA MAGDALENA.

Para estudiar la distribución espacial y variabilidad superficial de la temperatura, los nutrientes y la Cl_a, las figuras de la 15 a la 19, muestran la distribución superficial de las variables antes mencionadas en cada mes de muestreo. Los mapas de contornos fueron realizados de manera tal que se puedan identificar y diferenciar zonas dentro de la bahía. De tal forma que la escala de valores que lleva cada figura, es solo una guía para observar zonas de bajas, moderadas o altas temperaturas y/o concentraciones de los diferentes parámetros. Los mínimos y máximos están indicados en cada variable, correspondiente a cada mes.

4.2.1. Distribución espacial de la temperatura de las aguas superficiales de BM.

La temperatura de las aguas superficiales en el interior de BM en los meses de muestreos durante el 2005 varió de 16 a 27.9 °C (Fig. 15). El valor mínimo se registró en marzo y el máximo en agosto. En los dos primeros meses del año los valores entre estaciones fueron muy homogéneos; incrementando su variabilidad hasta 7 °C durante julio y agosto. Asimismo, se observa un gradiente de temperatura que va desde la boca hacia las zonas más someras del interior de la bahía. En los meses de marzo, julio y agosto este gradiente fue más evidente que el resto de los meses (mayor desviación estándar) básicamente por la influencia de aguas de la plataforma continental frías adyacentes a la bahía. En agosto se hace evidente el calentamiento del agua (20 a 27.9 °C), ocupando una mayor extensión dentro de la bahía; sin embargo aún se

observa la influencia del exterior. Finalmente, para noviembre el ciclo nuevamente se repite, observándose un rango de temperaturas entre 19 y 23 °C.

4.2.2. Distribución espacial de la concentración de nitrito en las aguas superficiales de BM.

La concentración de nitritos en el interior de BM en los meses de muestreo durante el 2005 varió de 0.01 a 0.31 μM (Fig. 16). El valor mínimo se registró en casi todos los meses de muestreo. En julio se registró el valor máximo y fue en este mes donde se observó un amplio intervalo de concentración, influyendo en que las desviaciones estándar de las concentraciones medias fueron más altas. Aunque en la mayoría de las estaciones estudiadas las concentraciones de nitritos son bajas, resaltan algunos núcleos de concentraciones de moderadas a altas hacia la parte de Punta Delgada y la boca principal (Fig. 16). Asimismo, en agosto las zonas someras del interior de la bahía también mostraron valores medios. Con respecto a la boca principal, se hace evidente el aporte de nitritos desde el exterior de la bahía durante enero, febrero, marzo y noviembre.

4.2.3. Distribución espacial de la concentración de nitrato en las aguas superficiales de BM.

La concentración de los nitratos en las aguas superficiales de BM en los meses de muestreos durante el 2005 varió desde valores no detectados hasta 19.35 μM (Fig. 17). Marzo fue el mes donde se registraron los valores más bajos y en julio los valores más altos, con un amplio rango de concentración. Las figuras resaltan algunos núcleos

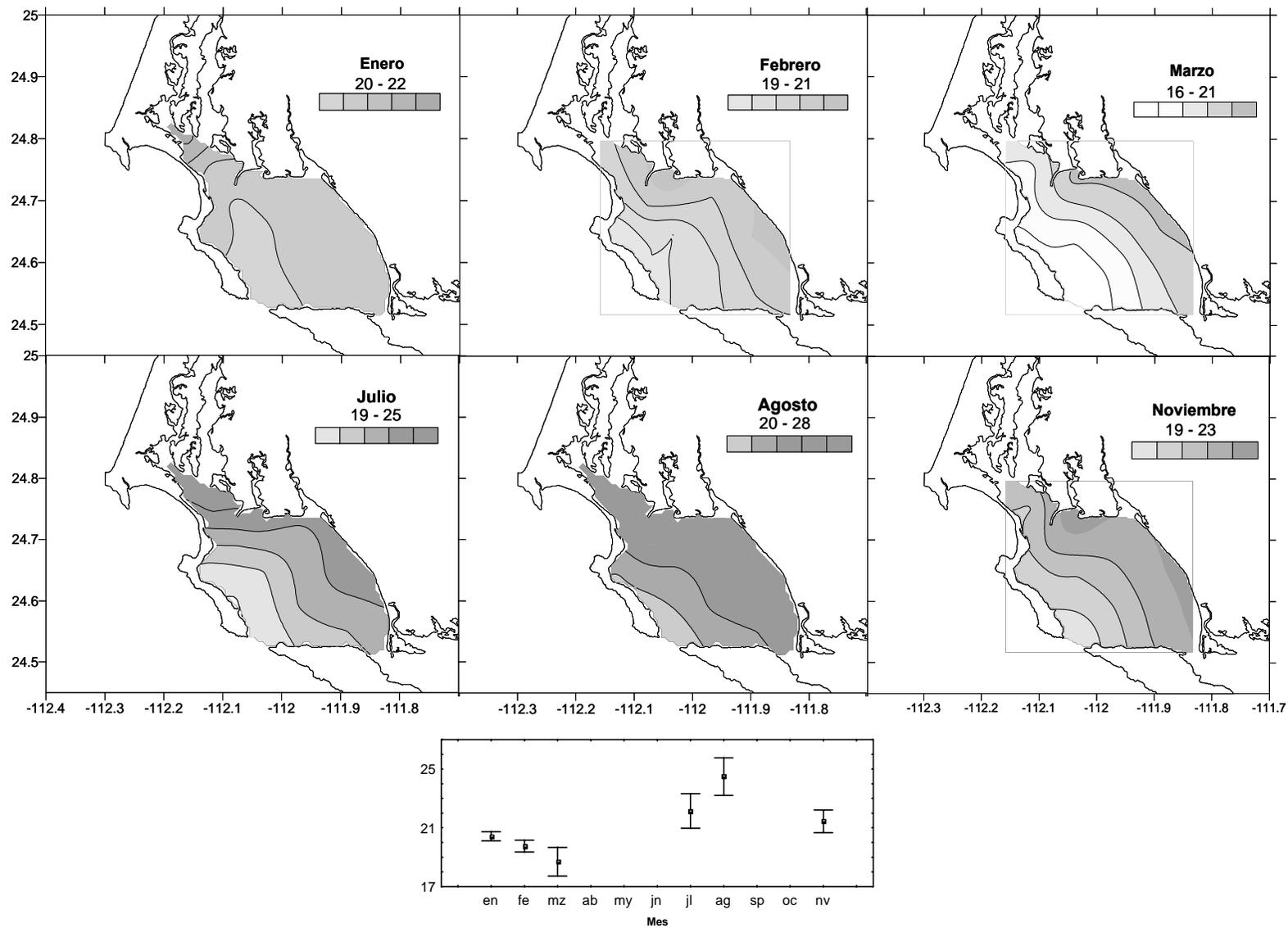


Fig. 7. Distribución espacial de la temperatura (°C) del agua de BM a 0.5 m de profundidad en los meses de muestreo. En el fondo de la gráfica se presenta el promedio e intervalo de confianza al 95%

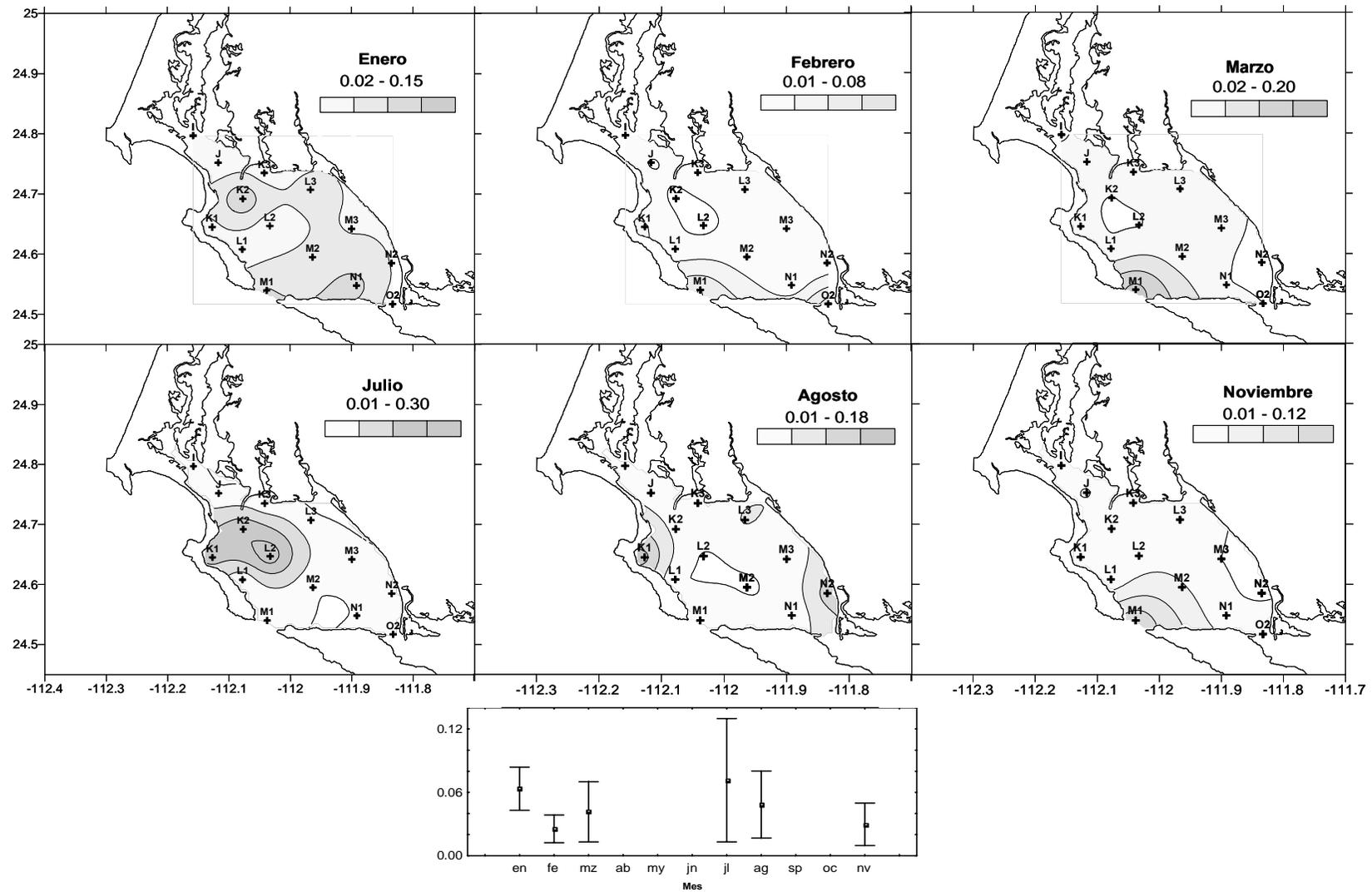


Fig. 86. Distribución espacial de la concentración de nitritos (μM) en el agua de BM a 0.5 m de profundidad en los meses de muestreo. En el fondo de la gráfica se presenta el promedio e intervalo de confianza al 95%

de concentraciones moderadas en febrero y noviembre hacia la parte de Punta Delgada, la boca principal (La Bocana) y las zonas de los canales. Por su parte, en julio y agosto las concentraciones en estos núcleos fueron altas y de mayor extensión. Es de resaltar los intensos cambios de concentración observados de marzo a julio y de agosto a noviembre.

4.2.4. Distribución espacial de la concentración de fosfato en las aguas superficiales de BM.

La variabilidad de la concentración de fosfato en las aguas superficiales de un mes a otro fue moderada; por lo general en todos los meses se mantienen concentraciones similares (Fig. 18). Los meses de enero, febrero y noviembre fueron muy similares, registrándose los valores más bajos. En marzo se comienza a observar la influencia de exterior, aumentando a una unidad las concentraciones de fosfato. Para julio se mantiene las concentraciones y luego disminuyen progresivamente hasta noviembre. Los núcleos más representativos están ubicados en la zona de los esteros, Puerto San Carlos y la boca principal.

4.2.5. Distribución espacial de la concentración de clorofila a en las aguas superficiales de BM.

Los niveles de Cl a en las aguas superficiales en el interior de BM en los meses de muestreos durante el 2005 fluctuó de 0.34 a 7.99 mg/m³ (Fig. 19). Los valores mínimos y máximos se registraron en julio. De enero a marzo se registró un aumento progresivo de la Cl a, identificándose zonas con concentraciones cercanas a 4 mg/m³.

En julio las concentraciones de Cl a aumentaron cerca del doble. Sin embargo, existen zonas con bajos niveles de los pigmentos, provocando que las desviaciones estándar fueran altas en ese mes. Para agosto la tendencia fue a disminuir hasta noviembre; de allí que se observan zonas con bajos niveles. Al igual que los fosfatos, los núcleos de altas concentraciones de Cl a están en la zona de los esteros, Puerto San Carlos y la boca principal.

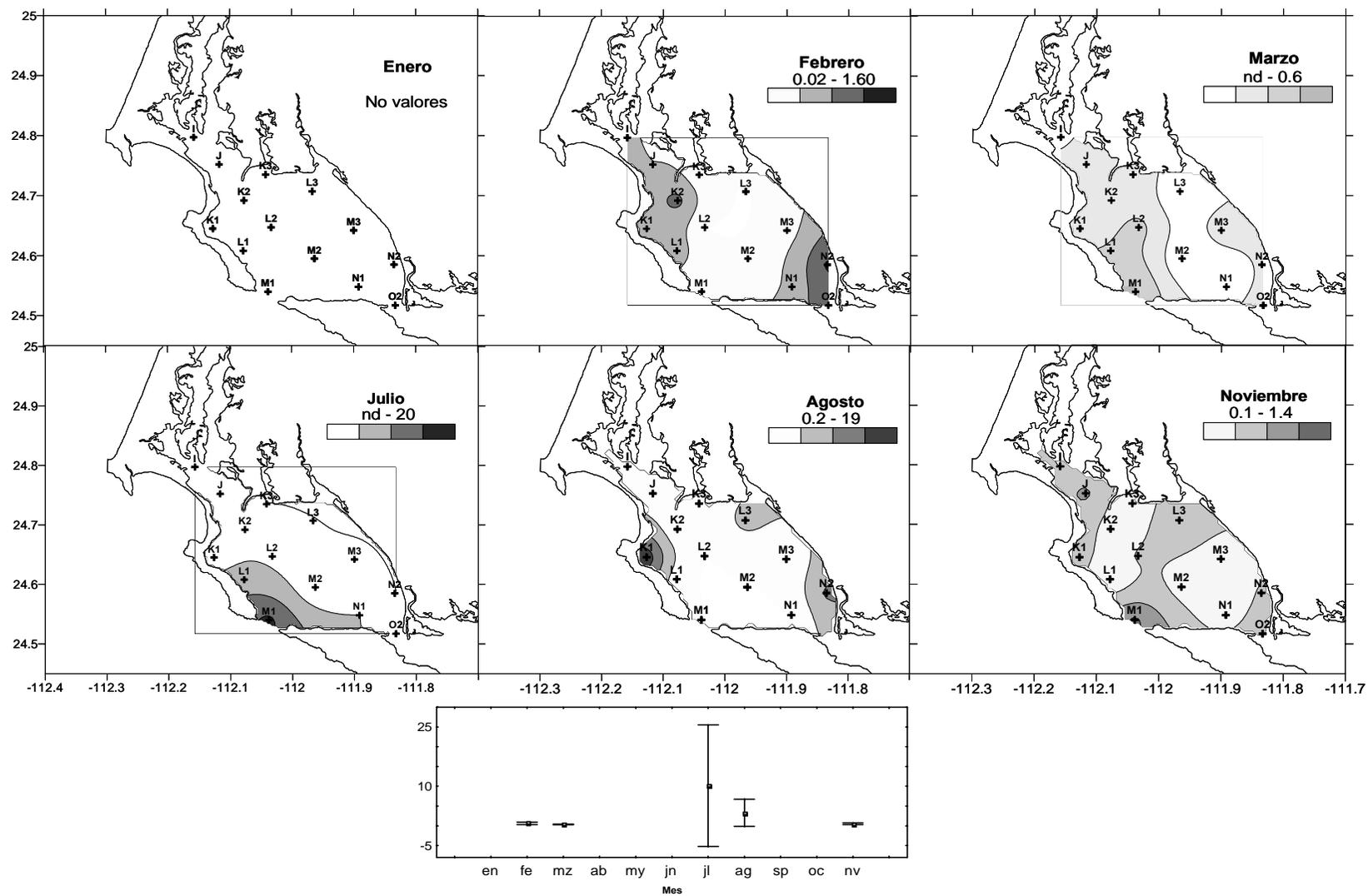


Fig. 97. Distribución espacial de la concentración de nitratos (μM) en el agua de BM a 0.5 m de profundidad en los meses de muestreo. En el fondo de la gráfica se presenta el promedio e intervalo de confianza al 95%

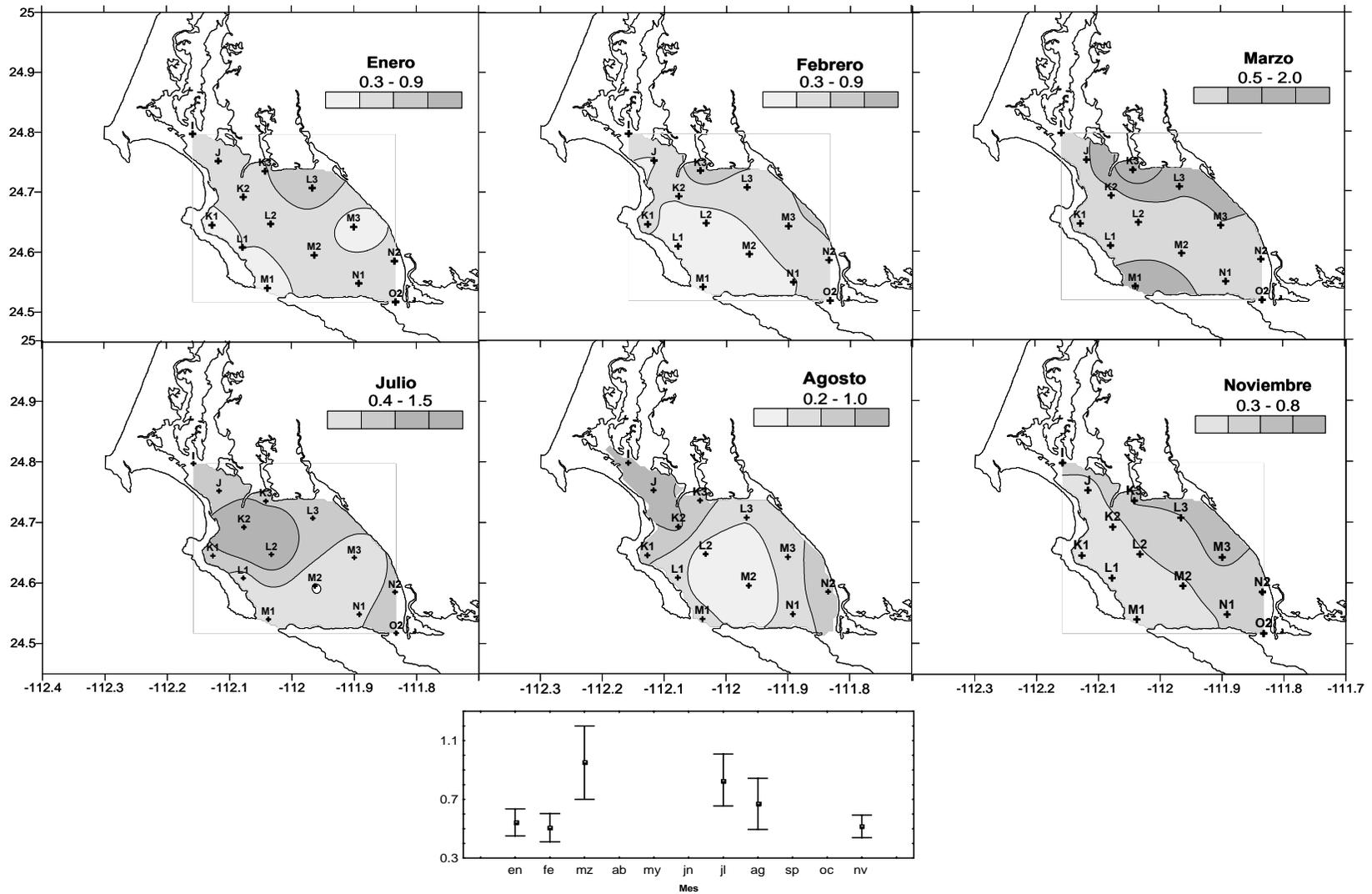


Fig. 108. Distribución espacial de la concentración de fosfatos (μM) en el agua de BM a 0.5 m de profundidad en los meses de muestreo. En el fondo de la gráfica se presenta el promedio e intervalo de confianza al 95%

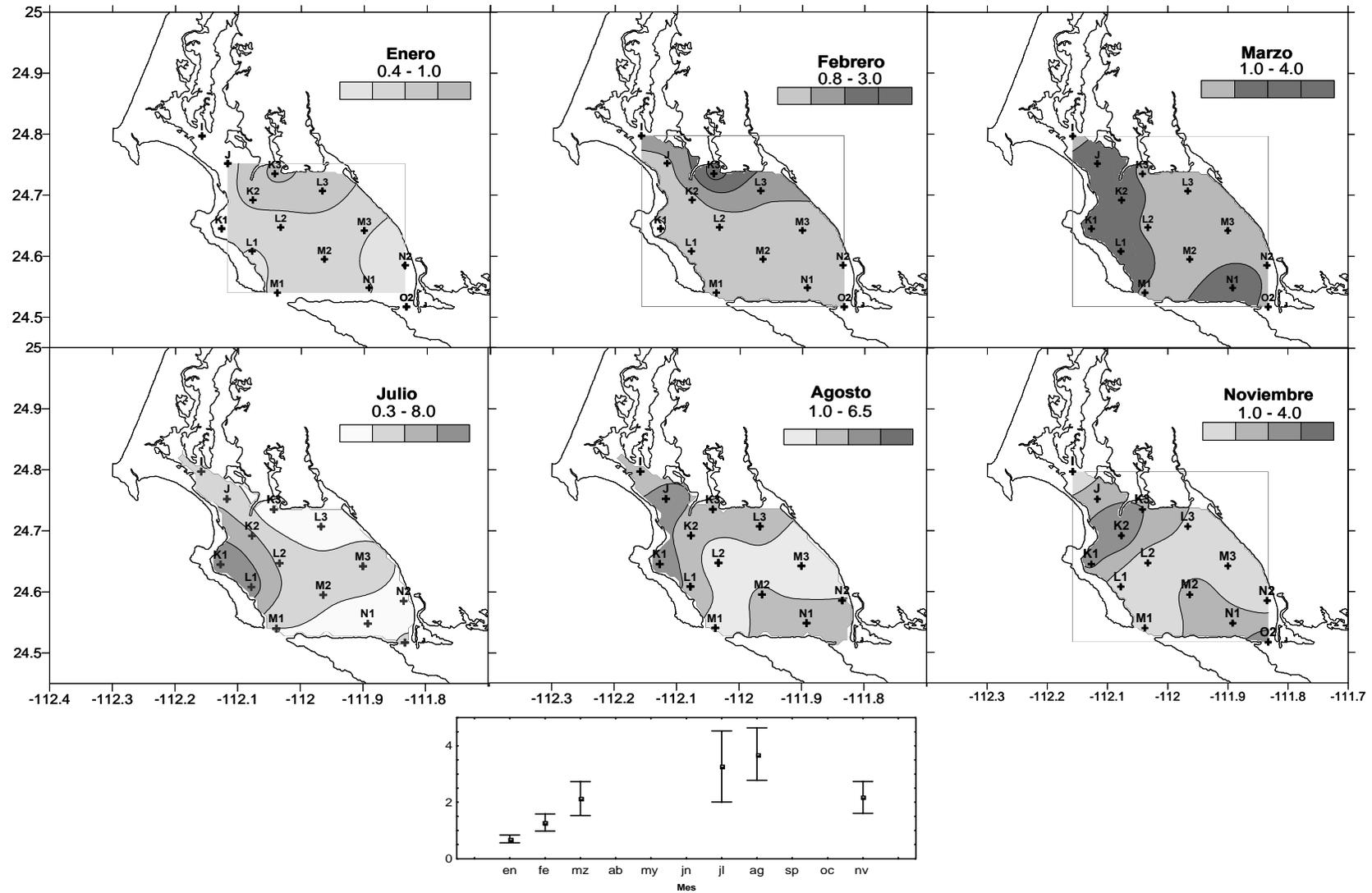


Fig. 11. Distribución espacial de la concentración de clorofila a (mg/m^3) en el agua de BM a 0.5 m de profundidad en los meses de muestreo. En el fondo de la gráfica se presenta el promedio e intervalo de confianza al 95%

5. DISCUSIÓN

5.1. Características físicas y químicas de las aguas de BM durante el invierno (diciembre del 2004, enero y febrero del 2005).

En invierno la temperatura fue relativamente calida (20.5 °C) y muy homogénea tanto en la columna de agua como en el interior de la bahía. Las concentraciones de nitratos, nitritos y de Cl a fueron bajas (condiciones oligotróficas), mientras que el fosfato se mantuvo con concentraciones moderadas entre 0.3 y 0.9 μM . Específicamente en diciembre del 2004 la columna de agua presentó una profunda capa de mezcla, con temperaturas entre 21 y 21.9 °C. Asimismo, en este mes se registraron valores altos de salinidad (alrededor de 34.4 ups). La distribución de nitritos, nitratos, fosfatos y los niveles de oxígeno disuelto siguieron el patrón característico de aguas mezcladas, fueron muy uniformes en la columna de agua durante ciclo de muestreo. Probablemente debido a las condiciones de mezclado y de marea, hubo pocas diferencias entre las aguas de la plataforma continental y la parte interna de la bahía. En este mes se registraron los promedios más bajos de nitrito (0.05 μM) y nitrato (0.79 μM). El fosfato mantuvo concentraciones medias cercanas a 0.4 μM . No obstante, a pesar de los bajos niveles de las fuentes de nitrógeno, los procesos de mezcla y el intercambio de oxígeno entre la atmósfera y las aguas superficiales posiblemente mantienen la columna de agua con un intervalo de saturación de oxígeno entre 65 y 125 %. Álvarez-Borrego *et al.* (1976) indicaron que la alta actividad fotosintética en BM usualmente provoca una disminución en la concentración de nutrientes y una sobresaturación de oxígeno de 120 %. Gómez-Gutiérrez *et al.* (2001) indicaron que la abundancia de eufausidos *Nyctiphanes simplex* en la plataforma continental fuera de

BM, disminuye dramáticamente durante invierno y otoño cuando la columna de agua es más cálida, está bien mezclada y con concentraciones bajas de fitoplancton debido a que se retrae la Corriente de California hacia el norte. Esto conlleva a que una reducción significativa de la biomasa planctónica sea transportada a través de la boca de la bahía por las corrientes de marea (Gómez-Gutiérrez y Robinson, en prensa).

Las concentraciones de los nitratos en las aguas superficiales se mantuvieron bajas, especialmente en la zona central de BM. Los procesos biogeoquímicos que se llevan a cabo en Punta Delgada y las zonas de los canales aportan nitratos a las aguas superficiales del sistema, que comparado con el promedio registrado en la boca durante el ciclo, es ligeramente más bajo ($0.6 \mu\text{M}$). Por su parte, el nitrito aunque es más complejo y variable, se ve favorecido por la entrada de agua de la plataforma continental al interior de BM, manteniendo concentraciones moderadas de este nutriente en la boca principal de la bahía. El fosfato se mantuvo constante de enero a febrero del 2005, con promedio de $0.5 \mu\text{M}$. Esto podría indicar que la variabilidad del fosfato tanto en el ciclo nictimeral como en el interior de la bahía durante estos meses fue mínima. Asimismo, en su distribución espacial resaltó un núcleo con valores cercano a $0.9 \mu\text{M}$ en las proximidades de Puerto San Carlos. Al parecer estos niveles de fosfatos están estimulando el crecimiento de fitoplancton en esta zona, pues coinciden con los núcleos elevados de $\text{Cl } a$ en esos meses. Pilson (1998) indicó que cuando el nitrógeno se agota en el agua, el crecimiento del fitoplancton ocurrirá si aún el fosfato está presente.

5.2. Características físicas y químicas de las aguas de BM durante la primavera (marzo del 2005).

En este estudio, la primavera está representada únicamente por el mes de marzo. Este mes fue el más frío de todos los meses de muestreo (16 °C) y a excepción de los nitratos, hubo un incremento del 50 % en las concentraciones de los nitritos y fosfatos superficiales. La concentración de la Cl a en las aguas superficiales registró un aumento de casi un 25 % en esta época en comparación al invierno. Los gradientes espaciales de temperatura y de nutrientes en las aguas superficiales fueron más intensos desde la boca hacia la parte interna de la bahía, indicando evidentes diferencias entre las aguas de la plataforma continental y de la bahía. Todo parece indicar que en marzo se presentaron eventos de surgencias en la bahía, aunque los valores de nitratos fueron bajos, probablemente debido al rápido consumo de este nutriente por parte de los productores primarios. Gárate-Lizarraga y Siqueiros-Beltrones (1998) encontraron tres picos de abundancia del fitoplancton en BM. Dos de ellos coinciden con los blooms de primavera (abril-mayo) y otoño (octubre-noviembre). Según Zaytsev *et al.* (2003) la máxima intensidad de la actividad de surgencias se presenta de abril a junio, como consecuencia de los vientos dominantes y la pendiente batimétrica en el declive continental. Al respecto, Sánchez-Montante (2004) observa que en abril del 2000, febrero del 2001 y marzo del 2003, existe un ascenso de las isotermas desde la región adyacente hacia la región de la boca de BM, cuyo gradiente fue más intenso en abril del 2000. En ese mes, las condiciones de surgencias fueron caracterizadas por un afloramiento hacia la costa de las aguas con temperaturas entre 14 y 15 °C y salinidad entre 34 y 34.2 ups.

5.3. Características físicas y químicas de las aguas de BM durante el verano (junio, julio y agosto del 2005)

Los meses de verano fueron los más cálidos del año, con condiciones de estratificación que fue relativamente débil en junio e intensa en agosto. Se registraron las mayores concentraciones de nutrientes y Cl a (condiciones eutróficas) con una alta variabilidad espacial. Asimismo, en estos meses se presentaron las mayores diferencias entre las aguas de la plataforma continental y de la bahía, especialmente durante agosto del 2005. La distribución espacial de la temperatura superficial demostró que durante esta época la variabilidad de la temperatura sufrió un incremento de hasta 7 °C. Esto se debió probablemente a dos factores principales: la presencia de intensos eventos de surgencias costera (julio) y la radiación solar (agosto).

La surgencia costera en junio del 2005 fue evidenciado por el enfriamiento tan marcado de las aguas superficiales en un corto periodo de tiempo y las mínimas temperaturas observadas en aguas de fondo (15.8 °C), aunado con los niveles bajos de oxígeno (1.34 ml/L) y las altas concentraciones de nutrientes. Los gradientes de temperatura en las aguas superficiales que va desde la boca hacia las zonas más someras del interior de la bahía, podrían estar indicando entrada de agua subsuperficial fría al interior del sistema. Además, las concentraciones de los nitratos y nitritos no estuvieron distribuidas de manera uniforme en la laguna (mayores intervalos de confianza de las concentraciones medias), con concentraciones elevadas en las estaciones cercanas a la boca de la laguna. Todo esto comprueba que los nitritos y nitratos son importados de la zona costera en el periodo de temperaturas frías. Lluch-

Belda *et al.* (2001) encontraron que las variaciones térmicas de la bahía parecen estar determinadas por la entrada de agua subsuperficial (surgencias) y por ingreso de agua superficial.). Gómez-Gutiérrez y Robinsón (en prensa) encontraron que las diferencias de temperaturas encontradas en la plataforma continental y la parte interna de la bahía durante marzo y julio, probablemente es causado por el efecto combinado de la alta radiación solar y fuertes eventos de surgencias sobre la plataforma continental moviendo aguas de surgencias dentro de la bahía. Además estos autores indican que la variabilidad de la temperatura a 4 m de profundidad en marzo y julio se debió a la presencia de frentes de marea, el cual provocaba fuertes gradientes térmicos. Sin embargo, en este estudio fue difícil detectar el frente de marea debido al tipo de muestreo realizado (Euleriano).

Durante los eventos de surgencias las aguas se enriquecen con nutrientes nuevos, lo que conlleva a un aumento de $Cl a$ (indicador de la biomasa fitoplanctónica) en las aguas superficiales y por consecuencia una saturación en los niveles de oxígeno por el aumento de la fotosíntesis total (Kirk, 1994). Esto se traduce a un aumento en la fijación de carbono y se consideran épocas de alta productividad (Nienhuis y Guerrero, 1985; Garate-Lizarraga y Siqueiros-Beltrones, 1998; Sánchez-Rodríguez y Cervantes-Duarte, 1999; Garate-Lizarraga *et al.*, 2001). Los máximos valores de $Cl a$ en la superficie durante la bajamar indican que la bahía tiene más $Cl a$ que la plataforma continental, existiendo una exportación de pigmentos de origen fitoplanctónico hacia fuera de la bahía, lo cual concuerda con Acosta-Ruíz y Lara-Lara (1977) y Guerrero-Godinez *et al.* (1988). Gómez-Gutiérrez y Robinsón (en prensa) encontraron que

durante el verano las concentraciones de Cl a fueron mas elevadas en comparación con marzo y diciembre, y estaban asociadas con bajas temperaturas. Todo esto muestra la relevancia de los nutrientes importados desde la plataforma costera en el periodo de surgencias para la producción del fitoplancton dentro de la laguna. Asimismo, y a diferencia de lo encontrado por Palomares-García *et al.* (2003) y Garate-Lizarraga *et al.* (2001) la distribución vertical de Cl a en la boca principal durante la época de surgencias fue verticalmente heterogénea. Cullen (1982) indica que la distribución vertical del fitoplancton en aguas estratificadas esta caracterizada por máximo de Cl a que corresponde a los gradientes de nutrientes.

El amonio a pesar de su indudable importancia, hasta ahora no se tiene registros publicados de los niveles de amonio en BM. Este es el primer trabajo que estima valores y tendencias de un componente crítico en el ciclo de nitrógeno en el mar. Las concentraciones de amonio encontradas durante el mes de junio del 2005 (no detectables – 3.30 μM), combinadas con la tendencia a incrementar durante el flujo de la marea (situación que no sucede con los demás nutrientes) parece indicar que el amonio depende no solo de los procesos biogeoquímicos *in situ* sino también de los aportes de amonio de la plataforma continental. Las concentraciones superficiales elevadas durante la pleamar indican que el amonio es más abundante en la plataforma continental que dentro de BM. Se infiere que existe un rápido consumo de amonio por parte de los productores primarios y las bacterias (Zehr and Ward, 2002) dentro de la bahía, debido a que los valores de amonio superficiales llegan a no detectarse dentro de la bahía y esta agua relativamente desprovista de amonio es movida a la plataforma

continental en la superficie (Fig. 20). Debido a que existe una insignificante difusión de nutrientes de las capas más profundas a aguas superficiales por la estratificación y como los tiempos de residencia de la masa de agua dentro de la bahía son relativamente grandes, junto con la asimilación de amonio por organismos autotróficos en la capa iluminada, favorece a un agotamiento total de la principal fuente de nitrógeno. Varela *et al.* (2003) en su estudio realizado en el área de surgencia del NW de España, sugieren que el amonio no se acumula en el área debido a un acoplamiento en escala de tiempo diarios entre la regeneración y la asimilación. Esto sugiere un mecanismo ecológicamente relevante a los continuos intercambios de aguas por corrientes de marea que tiene la bahía con el agua de la plataforma continental en condiciones de surgencias intensas y sostenidas por varios días. Sin embargo, no se cuenta con un registro de amonio superficial en el interior de la bahía que pudiera corroborar o refutar estas inferencias.

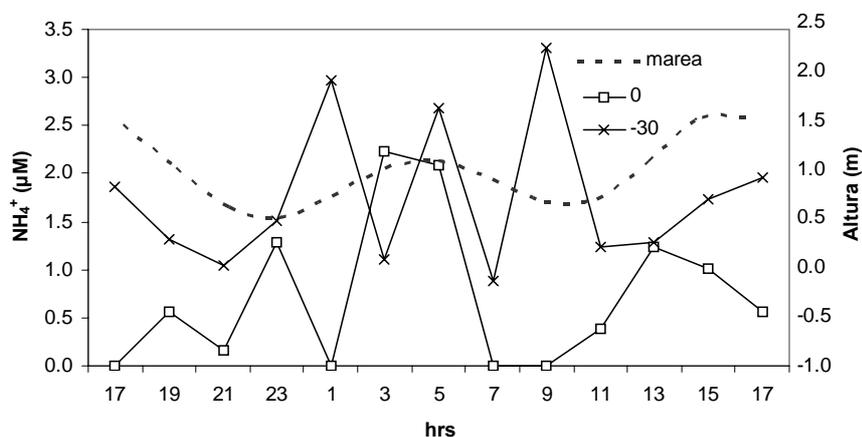


Fig. 12. Variabilidad temporal de las concentraciones de amonio en las aguas superficiales y a 30 m de profundidad en junio del 2005 (la escala fue modificada para ver la relación con la marea)

En media agua y cerca del fondo existen muchos factores que podrían elevar las concentraciones de amonio, como: remineralización, excreción de amonio por los organismos y los flujos de nitrógeno desde el sedimento. Teóricamente, en épocas de alta productividad primaria en BM se intensificarían los procesos de oxidación y subsecuente remineralización de la materia orgánica (reduciendo los niveles de oxígeno). El nitrógeno regenerado durante este proceso es principalmente en forma de amonio o urea (Dugdale, Goering 1967). Por otro lado los estudios han indicado que más de la mitad del nitrógeno excretado por los animales marinos es en forma de amonio (Degobbis, 1972). Los procesos que controlan el flujo de nitrógeno disuelto en la interfase sedimento-agua son más complejos, pues estos procesos incluyen a la resuspensión de sedimento por corrientes y biota béntica, irrigación y bioturbación de sedimentos por macrobentos, entre otros (Maksymowska-Brosard, 2001). Este autor realizó un estudio en el Golfo de Gdansk (al sur del Mar Báltico) y encontró concentraciones y bajos flujos de amonio en sedimentos arenosos. En BM los sedimentos en el canal de la Bocana están conformados por arenas muy gruesas (Shumilin *et al.*, 2005). Esto indicaría que probablemente en la boca principal de BM los flujos de amonio vía sedimento son insignificantes. Contrariamente, tanto en la zona central como en las zonas someras de BM, los sedimentos están compuestos generalmente por arenas finas (Shumilin *et al.*, 2005) asociados a menores velocidades de corrientes (Obeso-Niebla *et al.*, 1999; Sánchez-Montante, 2004), lo que podría significar que los flujos de amonio desde el sedimento en esta región es más significativa. Varios estudios en otras regiones costeras similares a BM indican que la influencia del fondo en la regeneración de nutrientes que enriquece la columna de agua

deben ser consideradas, en especial en relación a flujos de amonio, fosfatos y silicatos (Kristensen, 1993; Forjan *et al.*, 1994: En Falcao-Vale, 2003.).

El rango de concentraciones de las especies oxidadas de nitrógeno en junio del 2005 son cercanos a los reportados en el mismo estrato superficial por Álvarez-Borrego *et al.* (1975); Guerrero-Godinez *et al.* (1988); Hernández- Trujillo *et al.* (1997) y Zaytsev *et al.* (2003). Sin embargo, en el trabajo de Guerrero-Godinez *et al.* (1975) llegaron a registrar en la superficie valores tan altos como 0.40 μM para el NO_2^- y 19 μM para NO_3^- cuando las velocidades de las corrientes eran más intensas (0.60 m/s). La presente tesis es el primer estudio en informar la distribución vertical de nutrientes en la boca principal de BM. Cervantes-Duarte *et al.* (1992) estudiaron la distribución vertical de las concentraciones de los nutrientes en Bahía San Hipólito durante eventos de surgencias, encontrando que la isolínea de 20 μM de nitratos se inclinan a la superficie (~30 m) de la parte oceánica a la parte costera; indicando que esta distribución de nitratos es característico en eventos de surgencias. La poca relación de los nitratos y nitritos con la marea, probablemente indica que a diferencia del amonio, estos nutrientes no son consumidos tan rápidamente dentro de la bahía, a pesar del tiempo de residencia de las aguas y la cantidad de pigmentos fitoplanctónico presentes en el agua. Aparentemente hay un equilibrio dinámico de las especies oxidadas entre la bahía y la plataforma continental, que es independiente del consumo biológico.

Por su parte, las concentraciones de fosfatos (especialmente en aguas intermedias y fondo) experimentaron un aumento de más de 50% de diciembre del 2004 a junio del 2005, pero su variabilidad espacial dentro de la laguna fue reducida.

Los intervalos de confianza de las concentraciones promedias indicaron que a diferencia de los nitritos y nitratos, los fosfatos son usualmente homogéneos dentro de la bahía, al parecer este nutriente no es limitante en BM. Además esto sugiere que las concentraciones de fosfatos, no dependen principalmente de los aportes externos durante la época de surgencias, como es el caso de los nitratos. Estas condiciones de homogeneidad en gran parte de la bahía, durante algunos meses del año, también fue observada por Álvarez-Borrego *et al.* (1975) y Rosales-Villa (2004). Acosta-Ruiz y Lara-Lara (1978) encuentran que el fosfato tiene una tendencia irregular de variación durante el ciclo diurno y su intervalo de concentración oscilaron entre 1.0 y 1.82 μM en la superficie y 1.20 y 2.36 μM a 10 m de profundidad. Por su parte, Hernández-Trujillo *et al.* (1997) encuentra que las concentraciones de fosfatos van desde niveles indetectables hasta concentraciones de 1.9 μM . En este estudio, el intervalo total de variación tanto en la boca de BM como en el interior de la misma estuvo entre 0.1 y 2.35 μM .

Durante agosto del 2005 los intensos gradientes de densidad desarrollados (mayor calentamiento, 27.9 °C), inhibió la mezcla vertical, reduciendo la difusión de nutrientes hacia las capas superiores (Falkowski and Raven 1997) que provocó una disminución en las concentraciones de NID y de Cl a. No obstante, debido al gran volumen de agua intercambiado con el mar en ese mes y las intensas velocidades que alcanza las fases de marea (Obesos-Niebla *et al.* 1999; Sánchez-Montante 2004) los valores de oxígeno en la superficie se incrementaron hasta la saturación (entre 80 y 115 %). La literatura indica que los gradientes horizontales y verticales en la

concentración de oxígeno en el agua de mar refleja balance entre la entrada de oxígeno desde el intercambio de gas aire-océano, procesos biológicos de producción y consumo de oxígeno y advección de masas de agua (Pilson, 1996). Asimismo, durante el reflujo salió agua ligeramente más calida de la bahía hacia el exterior. Las condiciones inversas se presentan durante el flujo de la marea. El intercambio de agua con el mar abierto durante el flujo y reflujo es un proceso clave que regula los patrones hidrodinámicos y el transporte de masas en el interior del sistema (Acosta-Ruiz y Lara-Lara (1978); Guerreo-Godinez, *et al.*, 1988; Hernández-Trujillo, 1997; Zaytsev *et al.*, 2003; Sánchez-Montante, 2004). Este último autor observa el incremento de las variables termohalinas durante el reflujo de la marea, en años y meses diferentes, todas en mareas vivas; e indica que este comportamiento está asociado a un transporte de agua más cálida y más salada desde el interior de la bahía hacia la boca de BM. En este trabajo se demuestra que la modulación de las variables termohalinas con la marea son más apreciables en mareas vivas (amplitudes de 2.5 m) durante el calentamiento de verano (agosto).

La disminución de la concentración de nitrito y nitrato durante el periodo de relajamiento de surgencias (agosto), combinada con la estratificación de la columna de agua y el incremento de Cl a dentro de la bahía, conllevan a un agotamiento de los nitritos y nitratos en la superficie durante el reflujo de la marea. En menos de 6 horas y a pesar de las intensas velocidades en el reflujo, los nutrientes superficiales especialmente el nitrato, se agotan completamente. No obstante las concentraciones de amonio y fosfato, particularmente en las aguas intermedias y de fondo, permanecieron

con concentraciones moderadas (Tabla 2). La falta de nutrientes provoca que el fitoplancton deje de crecer y reproducirse. El zooplancton, el necton herbívoro y los parásitos se encargan de depredar y diezmar las poblaciones del fitoplancton (Gómez-Gutiérrez, comunicación personal). Al parecer hay un aporte significativo de nutrientes al sistema vía regeneración local de la oxidación de la materia orgánica. Asimismo, el aporte de amonio vía excreción de organismo también es importante, sobre todo después del periodo de surgencia. El bloom de fitoplancton en primavera es típicamente seguido de un bloom de zooplancton que se encargan de pastorear las células fitoplanctónica (Kirk, 1994). Palomares-García (2002) la biomasa zooplanctónica en BM está dominada por copépodos, cuya máxima abundancia se presentó durante agosto del 1997. Los productos de desechos de estos organismos contienen principalmente amonio, que son liberados a la columna de agua como productos de la degradación microbial. Adicionalmente, se han reportado valores elevados de biomasa zooplanctónica asociados al relajamiento de surgencias (Farfán y Álvarez-Borrego, *et al.*, 1983). Estos autores, realizaron estudios en Bahía San Quintín, una laguna costera localizada en la costa del Pacífico al norte de la península de Baja California, y encontraron que el rango de amonio fue de 0.00 hasta 3.02 μM , con promedio de 0.75 μM , durante junio y principio de julio. Estos valores son muy semejantes a los encontrados en este estudio.

A pesar del agotamiento de las concentraciones de nitratos superficiales en la boca de BM, en el interior de la bahía existen zonas con altos contenidos de nutrientes, especialmente hacia el NW y las zonas más someras. Sánchez-Montante (2004)

mencionó que BM presenta un remolino anticiclónico en la parte NW, que produce una resuspensión del material de fondo, dándole a esa área la particularidad de ser rico en nutrientes por más tiempo. Asimismo, a pesar de que en la boca se presentaron condiciones de estratificación, en el interior de la bahía las condiciones físicas presentan en general una elevada mezcla vertical, la cual debe estar asociada con el efecto del viento y por la fricción del fondo. La dinámica del sistema es lo suficientemente turbulenta como para eliminar la estratificación que pudiera ser provocada por la radiación solar (Sánchez-Montante, 2004). En las zonas someras también existe descomposición de materia orgánica por la acción microbiana principalmente en los sedimentos (Nixon *et al.*, 1990) que luego es resuspendido en la columna de agua por las corrientes de mareas o tormentas en la época de huracanes (agosto-septiembre). Al respecto, Nienhius y Guerrero (1985) indicaron que las altas concentraciones de nutrientes provienen de la remineralización del material orgánico que se produce en las zonas de manglar ubicados en los canales y en la parte oriental de BM. Al parecer, en este mes los procesos biogeoquímicos gobiernan la entrada de las especies nitrógenos al sistema.

El efecto de las corrientes de fondo, que arrastran y resuspenden material del fondo durante el flujo y reflujos de marea viva, también podría ser la causa que en agosto las concentraciones de los nutrientes a 15 y 30 m en la boca de la bahía son superiores que en la zona de la plataforma continental (máximos en bajamar). No obstante, de junio a agosto las aguas intermedias y fondo experimentaron una reducción de las concentraciones de nitrito y nitrato en el agua aproximadamente del

50 %. Como los niveles de oxígeno se mantienen comparativamente bajos, esto podría estar indicando, que a pesar de que hay formación de nitratos vía nitrificación y oxidación de la materia orgánica; las pérdidas de nitrógeno son mayores en las aguas intermedias y fondo, probablemente vía consumo por el fitobento y hundimiento en los sedimentos. Según Lohse *et al.* (1993) en el caso del reciclamiento del nitrógeno, los sedimentos son la causa principal de hundimiento en el ciclo biogeoquímico de este elemento, regulando así su concentración y, por lo tanto, la productividad de los sistemas marinos costeros. Se piensa que las pérdidas de nitrógeno vía desnitrificación, son más significativas en las zonas más someras del interior de la bahía, donde probablemente existan condiciones hipóxicas con alto contenido de carbono orgánico (Falkowski and Raven, 1997). Sin embargo, en el interior de la bahía solo se han obtenido muestras superficiales, y existen pocos trabajos sobre el tema en la zona que puedan ayudar a explicar estos resultados. El nitrógeno que es reciclado en la columna de agua (y no desnitrificado) estimula a otros ciclos de producción primaria y por lo tanto puede continuar la fuente de la materia orgánica al sedimento, conduciendo a más descomposición y a más consumo de oxígeno disuelto (Palmer *et al.*, 2000).

5.4. Características físicas y químicas de las aguas de BM durante el otoño (noviembre del 2005)

En este estudio el otoño estuvo representado únicamente por el mes de noviembre, registrando un promedio de temperaturas del agua superficial de 21.4 °C y temperaturas cercanas a 16 °C en aguas de fondo. Los bajos valores de salinidades

registrados (~33.6 ups) hacen suponer que esta agua es netamente de origen oceánico (agua netamente de la plataforma continental), pues los aportes de agua dulce en esta época son prácticamente nulos (Rosales-Villa, 2004). En este mes la columna de agua presentó una intensa estratificación, con una termoclina entre 5 y 10 m de profundidad. Se presentaron mareas vivas (amplitud de 2.3 m), pero no mostraron relación evidente con las variables conservativas (temperatura y salinidad). La saturación del oxígeno estuvo entre 65 y 85 %, y estos valores fueron muy constantes durante el ciclo nictimeral. Por lo general, estos valores fueron los más bajos registrados en la columna de agua en todos los meses de muestreo. Los niveles de Cl^- en la columna de agua en la boca principal fueron bajos con respecto a los otros meses (0.87 y 2.95 mg/m^3). Si los nutrientes son bajos, aunque el fitoplancton puede fotosintetizar en una tasa más alta, ellos no pueden incrementar su biomasa y por tanto la tasa de fotosintética por unidad de volumen o área se mantiene baja (Kirk, 1994). Se infiere que la reducción de los niveles de Cl^- en la boca principal de la bahía se deba a que parte es exportada fuera de la laguna gracias a las corrientes de mareas y al pastoreo del zooplancton. Probablemente este último contribuyo de manera significativa al aporte de amonio al sistema.

Contrariamente a los parámetros termohalinos, la variabilidad de las concentraciones de los nutrientes en la boca principal de BM durante noviembre del 2005 tuvo cierta relación inversa con la altura de la marea, especialmente en la bajamar cuando los nutrientes se incrementaron (particularmente el nitrato). Asimismo, la distribución horizontal de nitrito y nitrato en BM durante noviembre del 2005,

demuestran que existe un aporte de estos nutrientes de las aguas de la plataforma continental de BM al interior de la bahía. Las concentraciones del fosfato en noviembre del 2005 fueron similares a los encontrados en los primeros meses del año, y uniformes entre las estaciones. A diferencia de los nutrientes nitrogenados, no hay un aporte importante de fosfatos desde la plataforma continental. Rosales-Villa (2004) encontró una clara influencia de las aguas de la plataforma con altas concentraciones de nutrientes y bajas temperaturas de la boca hacia el resto de la bahía en los meses de noviembre y mayo del 2005.

5.5. Contribución de los nutrientes nitrogenados y ciclo biogeoquímico del fosfato.

La contribución del amonio, nitrito y nitrato como fuentes de nitrógeno (tabla 3) nos indica que la fuente de nitrógeno dominante al sistema en los meses de muestreo fue el nitrato. La contribución del amonio fue mayor que la del nitrito, y ambos tuvieron aumentos en la concentración en el periodo de relajamiento de surgencias, mientras que la contribución de nitratos disminuyó. Cabe destacar que en noviembre del 2005, la el amonio contribuye de manera importante como fuente de nitrógeno a las aguas superficiales.

Tabla 3. Contribución porcentual de nutrientes nitrogenados (amonio, nitrito y nitrato) en la columna de agua de la boca de BM por mes de muestreo. Diciembre fue calculado sin la contribución del amonio.

Mes	NH ₄ ⁺ (%)			NO ₂ ⁻ (%)			NO ₃ ⁻ (%)		
	sup	inter	fond	sup	inter	fond	sup	inter	fond
Diciembre04	-	-	-	~10	~12	~8	~90	~88	~92
Junio05	15	5	9	5	5	5	80	90	86
Agosto05	17	15	21	7	10	10	76	75	69
Noviembre05	43	22	18	3	5	4	54	73	79

(-) No valores

El comportamiento del fosfato en las aguas de BM durante los meses de muestreo, puede significar que la bahía cuenta con sus propias reservas de fosfatos, que se derivan de los procesos biogeoquímicos y de los aportes (bióticos o abióticos) que se llevan a cabo en los diferentes sitios del sistema lagunar. Se presume que dentro de la bahía los procesos de regeneración del fosfato son muy importantes. Estos generalmente son llevados a cabo en la interfase sedimento-agua, por medio de actividades bacterianas, existiendo una relación estrecha entre el suministro de materia orgánica y la presencia de nutrientes (Lohse *et al.* 1993).

La fuente principal del fósforo disuelto es la erosión de las rocas continentales; y es ampliamente reconocido que el fósforo es un elemento con una elevada reacción con las partículas. Cuando está en solución, el fosfato reacciona rápidamente con una gran variedad de superficies, siendo tomado y liberado de esas partículas a través de

una complicada serie de reacciones químicas. En aguas estuarinas y costeras, el mecanismo de amortiguación del fosfato en los sedimentos (bentónicos o suspendidos), controla las concentraciones de fosfatos a valores relativamente constantes independientemente del consumo biológico o de los aportes exógenos. Conceptualmente, una gran cantidad de fosfatos contenidos en las partículas está disponible para su liberación al medio si las condiciones cambian para provocar la liberación del fosfato. En algunos lugares la presencia de fosfatos está asociada con aguas estratificadas que mantienen y favorecen a los sedimentos anóxicos y propician la liberación de fosfatos hacia la columna de agua (Taft y Taylor, 1976). Según Shumillin *et al.* (2005) los altos valores de arsénico encontrados en los sedimentos localizados en frente del Puerto San Carlos, en la zona adyacente del Canal San Gil y en algunas áreas en la porción central de BM, están asociados con la acumulación de fragmentos de mineral de fosfato, proveniente de rocas sedimentarias ricas en fosfatos en el área de drenaje del arroyo Las Bramonas durante eventos de tormentas tropicales al final del verano y el otoño.

Otra fuente importante de nutrientes en el interior de BM podrían ser los sistemas de manglares, ya que son fuente altamente productiva de materia orgánica que puede ser transferido a aguas costeras adyacentes a través de la exportación de detritus y organismos vivos (Robertson y Duke, 1990: En Jennerjahn y Ittekkot, 2002).

5.6. Tipos de agua

En el área de La Bocana se identificaron dos tipos de aguas con salinidades diferentes (Fig. 21). Una corresponde a aguas de la plataforma continental con

salinidades inferiores de 33.7 ups y temperaturas entre 16 y 21 °C; y la otra corresponde a aguas propias de la bahía con salinidades mayores a 33.9 ups y temperaturas entre 16 y 23 °C. Las aguas de la plataforma continental fueron registradas principalmente durante noviembre y las aguas costeras en los restantes meses de muestreo. Robinson *et al.* (2000) y Gómez-Gutiérrez, *et al.* (2001) reportaron que en la boca principal de BM durante marzo, julio y diciembre de 1996, se presentaron condiciones ambientales significativamente diferentes asociadas con la presencia de la Corriente de California (CC) (Temp.: 14 y 18 °C; Sal.: 34.2 y 34.4 ups), de procesos de surgencia local (marzo y julio) y la corriente Nor Ecuatorial (Temp.: 16 y 21 °C; Sal.: 34.23 y 35.0) en diciembre. Al respecto, Cervantes-Duarte, *et al.* (1992), en un estudio realizado en el mes de junio en el área costera de Bahía San Hipólito, identificaron masas de agua proveniente de la Corriente California con temperaturas y salinidades menores a 20 °C y superiores a 34 ups, respectivamente. La mayoría de sus registros correspondió al agua de la Corriente de California modificada (T: 10 – 20 °C y S: 34 – 34.6 ups) por mezcla lateral y en menor proporción, al agua subsuperficial subtropical (T: 10 – 15 °C y S: 34.6 – 35). La literatura indica que durante los meses de septiembre y noviembre se presentan giros de circulación en el mar adyacente del sistema lagunar Bahía Magdalena-Almejas por debajo de los 200 m de profundidad, intensificando el transporte de agua cálida y salobre de latitudes tropicales, favoreciendo la actividad de surgencias en la costa occidental de Baja California Norte (Christensen y Rodríguez, 1979; En Sánchez-Montante, 2005). Por su parte, Wyllie (1960) indica que el análisis descriptivo de las masas de agua de las regiones costeras de la Península de Baja California supone la influencia de las masas de agua transportada

5.7. Razones de Redfield

El ciclo del nitrógeno controla la disponibilidad de nutrientes nitrogenados y la productividad biológica en los sistemas marinos (Ryther and Dunstan, 1971) y está ligados a la fijación de dióxido de carbono atmosférico y la exportación de carbón desde la superficie del océano (Zehr and Ward, 2002). Sin considerar los micronutrientes (particularmente el hierro), todo parece indicar que en BM en épocas de relajamiento de surgencias (especialmente en diciembre y noviembre) el elemento limitante es el nitrógeno. Esto se confirma aun más a través de las razones de Redfield (Fig. 22). Es notable que la razón de Redfield cambia de acuerdo a la disponibilidad de NID. En junio del 2005 existe un aporte significativo de nutrientes nuevos al sistema, esto produce elevadas razones ($>16:1$) y una mayor dispersión de N:P. No obstante, a excepción de las aguas de fondo (especialmente en agosto y julio), en todos los meses de muestreo las razones N:P encontradas en la boca principal de BM están por debajo de la razón de Redfield (16:1).

Desde el punto de vista de los ciclos biogeoquímicos, los estudios realizados en zonas costeras donde examinan los cambios estacionales de nitrógeno y fósforo, indican que la circunstancia común es que el nitrógeno es el nutriente limitante. Observan que la razón N:P está siempre por debajo de la razón de Redfield, y exhiben mínimos en verano. Al parecer esta situación podría ser causada por procesos activos de desnitrificación en los sedimentos de estos sistemas, que se intensifican con el aumento de la temperatura (Pilson, 1998). Contrariamente, los estudios realizados por Garate-Lizarraga y Siqueiros-Beltrones (1998) encontraron especies de cianobacterias dentro de la comunidad del fitoplancton en BM, que podrían contribuir con una entrada

de nitrógeno al sistema (Kirk, 1994; Falkowsky, 1997). No obstante, por lo general las tasas de fijación de nitrógeno en zonas costeras son mas bajas que la desnitrificación (Howarts et al., 1988). Según Seitzinger (1988) el proceso de desnitrificación puede disminuir hasta en un 40% la cantidad de nitrógeno en los océanos y afecta las razones N:P en la superficie. De tal forma que la concentración de nutrientes en aguas marinas someras cercana a la costa, parece estar fuertemente afectada por los procesos presentes en la interfase sedimento-agua.

Contrariamente, las aguas de fondo en agosto del 2005 (y en parte en julio) las razones N:P fueron cercanas y en algunos casos mayores a las razones 16:1. Lo que podría estar indicando que en esa época hay mayor disponibilidad de nitratos vía remineralización y el fosfato está por debajo de la proporción esperada. Los estudios señalan que hay diferencias entre la razón N:P de los principales océanos del mundo y en las aguas superficiales y de fondo. Debido a las variaciones de la razón fijación/desnitrificación, altas tasas de remineralización, efectos antropogénicos, disponibilidad de hierro eólico, producción exportada, patrones de circulación, entre otros (Falkowski, 1997; Pahlow y Riebesell, 2000). Específicamente en el Océano Pacífico las razones N:P están cercanas a 14.76 (Falkowsky, 1999).

Asimismo, las razones dependen de la composición de los organismos, los cuales pueden variar considerablemente entre especie, individuo y/o la etapa del ciclo de vida (Pilson, 1998). Las diferencias en la composición elemental puede derivarse de la variabilidad interespecífica entre las especies de algas con diferentes requerimientos de C:N:P bajo condiciones óptimos de crecimiento o aclimatación fisiológica para el crecimiento bajo limitaciones de nitrógeno o fósforo (Geider y La Roche, 2002).

Gárate-Lizarraga y Siqueiros-Beltrones (1998) encontraron que las diatomeas y dinoflagelados fueron los grupos más diversos y abundantes, seguido por las cianobacterias en BM. Falkowsky and Raven (1999) indica que las diatomeas son comunes en ambientes ricos en nutrientes, tales como surgencias, y pueden adquirir nutrientes rápidamente y almacenarlos. También existen especies de dinoflagelados que pueden almacenar nutriente, para posteriormente utilizarlo en sus actividades metabólicas. Por su parte, las cianobacterias pueden sobrevivir a condiciones extremas de nutrientes ya que tienen la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico (Kirk, 1994). Especialmente en diciembre del 2004 la razón N:P están > 5 lo que podría significar limitaciones de nitrógeno (Geider y La Roche, 2002). En el sistema lagunar existen especies importantes (neríticas o bénticas) que desarrollan esporas resistentes (*Chaetoceros*, *Coscinodiscus*, *Paralia* y *Odontella*), para sobrevivir en periodos de condiciones desfavorables. La especie *Prosbocia alata* es común en la costa de California y el Golfo de California, se adapta y prolifera en aguas oligotróficas, pero frecuentemente bajos pulsos de nutrientes (Gárate-Lizarraga y Siqueiros-Beltrones (1998). Estos autores concluyen que la natural transición del área posee un ambiente ideal para el comportamiento de estas especies altamente oportunistas, y que la mezcla de diferentes masas de agua causa un incremento en la diversidad. Indicando que en BM posiblemente existan diferencias estacionales en las características fisiológicas del fitoplancton.

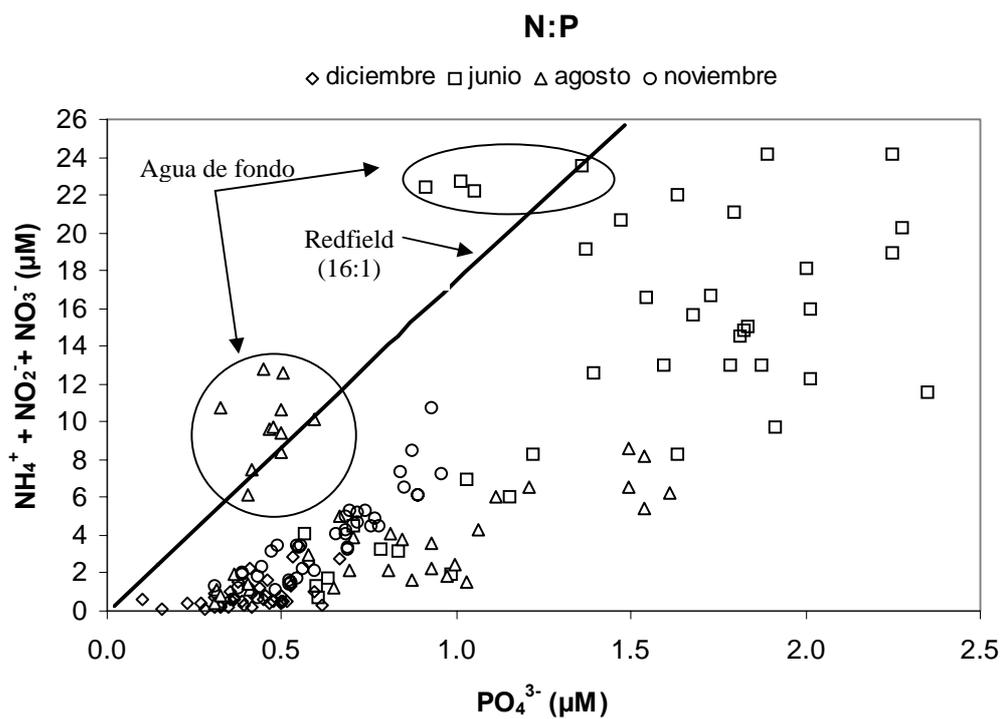


Fig. 142. Relación de NID (sumatoria de amonio, nitrito y nitrato) con los fosfatos en la columna de agua en diferentes meses del año. La línea representa la razón de Redfield, 16:1.

6. CONCLUSIONES

Bahía Magdalena responde a las variaciones del Sistema de la Corriente de California en su parte meridional y de los procesos locales presentes en el interior de la bahía. En invierno las aguas presentan condiciones oligotróficas, con una buena mezcla vertical y altos niveles de saturación de oxígeno. Durante el periodo de intensas surgencias (primavera-verano) la bahía tiende a adquirir las características del sistema. Las aguas son más frías, más densas, con mayores concentraciones de NID y concentraciones de Cl a intermedias (condiciones eutróficas). Hacia el final del verano las surgencias se relajan y las aguas de la bahía adquieren la mayor temperatura y se observa un fuerte gradiente con las aguas de la plataforma continental. Los nutrientes aunque son altos son aprovechados al máximo por el fitoplancton, lo que provoca las mayores concentraciones de Cl a del año. Durante el otoño las aguas presentaron salinidades inferiores a 33.7 ups, indicando la presencia neta de las aguas de la plataforma continental en la bahía. La especie reducida (nitrógeno amoniacal) contribuye de manera significativa como fuente de nitrógeno al sistema durante esta época, debido a la oxidación de la materia orgánica y las excreciones de organismos marinos.

Durante los eventos de surgencias existe una importación de NID (alto porcentaje de NO_3^-) y exportación de pigmentos de origen fitoplanctónico. Esta importación es muy importante para suplir los requerimientos de nitrógeno por parte de los organismos dentro del sistema.

Los procesos que controlan las concentraciones de fosfatos en Bahía Magdalena operan de manera independiente a los otros nutrientes. La bahía cuenta con sus propias reservas de fosfatos y no dependen principalmente de los eventos de surgencias.

Las razones N:P en las aguas de Bahía Magdalena están por debajo de las reportadas por Redfield (16:1), independientemente de la época del año y la condición de marea. Se observó limitación de nitrógeno en las aguas superficiales, especialmente en invierno.

7. RECOMENDACIONES

1. Realizar estudios dirigidos hacia la productividad primaria y los ciclos de carbono en Bahía Magdalena, para poder entender mejor las variaciones de los NID y la CI a.
2. Determinar amonio y oxígeno disuelto en la red de estaciones ubicadas en el interior del sistema.
3. Continuar con los ciclos nictimerales en diferentes épocas del año, a profundidades donde la columna de agua lo permitida, en las zonas cercanas al Puerto de San Carlos, Punta Delgada y las zonas de canales de la bahía. Esto dará una mejor información acerca de los aportes de NID provenientes de estos lugares.
4. Realizar estudios en la interfase sedimento-agua, para poder entender mejor los procesos de desnitrificación que se lleva a cabo en los sedimentos.
5. Realizar estudios enfocados a ciclos bacterianos y realizar determinaciones de la composición del fitoplancton, para poder entender mejor la variabilidad de las razones de Redfield en estos sistemas tan dinámicos y complejos como los es el sistema Lagunar Bahía Magdalena-Almejas.

8. BIBLIOGRAFIA

Acosta-Ruíz, M. and Lara-Lara, J., 1978. Resultados físico-químicos de un estudio de variación diurna en el área central de Bahía Magdalena, B. C. S. Cienc Mar. 5 (1): 37-46.

Alvarez-Borrego, S., Galindo-Bect, L. and Chee-Barragán, A., 1975. Características hidroquímicas de Bahía Magdalena, B. C. S. Cienc Mar. 2 (2): 94-109.

Bakun, A. and Nelson, C. 1977. Climatology of upwelling related processes off Baja California. CalCOFI Reports. 19: 107-127.

Bendschneider y Robinson (1952)

Casas-Valdez, M., 1987. Distribución en tiempo y espacio de las especies de sardina y macarela en Bahía Magdalena, B.C.S., México. Inv. Mar. CICIMAR. 3 (2):11-30.

Cervantes-Duarte, R., Aguiñiga-García, S. and Hernández-Trujillo, S., 1992. Condiciones de surgencias asociadas a la distribución de zooplancton en San Hipólito, B.C.S. Cienc Mar. 19 (1): 117 – 135.

Cullen J. J., 1992. The deep chlorophyll maximum: comparing vertical profiles of chlorophyll a. Can J. Fish. Aquat. Sci. 39: 791-803, 320.

Degobbis, D., 1972. On the of storage of seawater for ammonia determination. Mar Res. Reports., 146-148.

Dugdale, R. and Goering, J., 1967. Uptake of new and regenerated forms of nitrogen in primary productivity. Limnol. Oceanogr. 12: 196-206.

Falcao, M. and Vale, C., 2003. Nutrient dynamics in a coastal lagoon (Ria Famosa Portugal): The importante of lagoon-sea water exchanges on the biological productivity. Cienc Mar. 29 (3): 425-433.

Falkowski, P. and Raven, J., 1997. Aquatic Photosintesis. Balckwell press. 375.

Farfan, B. and Borrego-Alvarez, S., 1983. Variability and the fluyes of nitrogen and organic carbon at the Mouth of a Coastal lagoon. Estuar. Coast. Shelf Sci. 17: 599-612.

- Feliz-Pico, E. and García-Domínguez, F., 1992. La comunidad de invertebrados bentónicos asociados a la almeja catarina, *Argopecten circularis* (Sowerby, 1835) en Bahía Magdalena, B.C.S. Universidad de Michoacana. 6:46-53.
- Fourqurean, J., Jones, R., and Zieman, J., 1993. Processes influencing water column nutrient characteristics and phosphorus limitation of phytoplankton biomass in Florida Bay, FL, USA: Inferences from spatial distributions. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 36: 295-314.
- Forjan, J., Blasco, J. and Gómez-Parra., 1994. Spatial and seasonal variation of *in situ* benthic fluxes in the Bay of Cadiz (South-west Spain). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 39:127-141.
- Funes-Rodríguez, R., González-Armas, R. and Avedaño-Ibarra. R., 1998. Distribución y abundancia de las larvas de peces en el sistema lagunar Bahía Magdalena-Almejas, Baja California Sur, México. *Hidrobiol.* 8 (1): 55:66.
- Froelich, P. N., 1988. Kinetic control of dissolved phosphate in natural rivers and estuarios: a primer on the phosphate buffer mechanism. *Limnol. Oceanogr.* 36: 649-668.
- Gárate-Lizárraga I. and Siqueiros Beltrones, D., 1998. Time variation in phytoplankton assemblages in a subtropical lagoon system after the 1982-1983 "El Niño" event (1984 to 1986). *Pacif Sci.* 52 (1): 79-97.
- Garate-Lizarraga, I., Verdugo-Díaz, G., Sequeiros-Beltrones, D., 2001. Variación de las asociaciones fitoplanctónicas durante 1988/1989 en un sistema lagunar subtropical de la costa oeste de México. *Ocean.* 16 (1): 1-16.
- Gargett, A., 1997. Physics to fish: Interactions between physics and biology on a variety of scales. *Oceanogr.* 10 (3): 128 -131.
- Geider, R. and La Roche, J., 2002. Redfield revisited: variability of C:N:P in marine microalgae and its biochemical basis. *Eur. J. Phycol.* 37:1-17.
- Gómez-Gutiérrez, J., Palomares-García, R., Hernández-Trujillo, R. and Carballido-Carranza, M., 2001. Community structure of zooplankton in the main entrance of Bahía Magdalena, México, during 1996. *Rev. Biol. Trop.* 49 (2): 545-558.

Gómez-Gutiérrez, J. and Robinson, J. C., (En prensa). Tidal current transport of epibenthic swarms of the euphausiid *Nyctiphanes simplex* in a shallow, subtropical bay in the Baja California peninsula, México. Mar. Ecol. Progr. Ser.

Guerrero-Godínez, R., Cervantes-Duarte, R. and Jiménez-Illescas, A., 1988. Nutrient variation during a tidal cycle at the mouth of a coastal lagoon in the Northwest of México. Indian J. Mar. Sci. 17: 235-237.

Hattori, A. and Myers, J., 1966. Reduction of nitrate and nitrite by subcellular preparations of *Anabaena cylindrical*. II. Reduction of nitrate to nitrite. Pl. Cell. Physiol. 327-337.

Hernández-Trujillo, S., Cervantes-Duarte, R. and Aguiñiga-García, S., 1997. Variación espacial y temporal de algunas variables físicas, químicas y biológicas en Bahía Magdalena, Baja California Sur (julio-agosto, 1988). Rev. Inv. Cient. Ser. Cienc. Mar. UABCS. 8 (1-2):1-13.

Hernández-Rivas, M., Gómez, G., Sánchez, O., Saldierna, R. and Vera, R., 1993. Atlas de temperatura superficial en el complejo lagunar de Bahía Magdalena-Almejas, Baja California Sur, México. 1980-1989. Atlas Oceanográfico Nacional, Secc. Físico-químicos, Vol. II, N° esp. 1, 4p.+ 84fig.

Jennerjahn, T. and Ittekkot, V., 2002. Relevance of mangroves for the production and deposition of organic matter along tropical continental margins. Review Article. Naturwissenschaften. 89:23-30.

Keizer, P., Hargrave and Gordon, D., 1989. Sediment-water exchange of dissolved nutrients at an intertidal site in the upper reaches of the Bay of Fundy. Estuar. 12 (1): 1-12.

Kirk, T. J., 1994. Light & Photosynthesis in Aquatic Ecosystems. Cambridge University Press, New York.

Kristensen, E., 1993. Seasonal variations in benthic community metabolism and nitrogen dynamics in a shallow, organic-poor Danish lagoon. Estuar. Coast. Shelf Sci. 36: 565-586.

Lavín, M., Beier, E., Badan, A., 1977. Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: Escalas estacionales e interanual. En: Contribuciones a la oceanografía física en México, Monografía N° 3. Unión Geofísica Mexicana. 141-171.

Lankford, R. R., 1977. Coastal Lagoons of Mexico: Their Origin and Classification. In Martin Wiley (Ed). Circulation Sediments, and Transfer of Material in the Estuarine Processes. Vol. II. Academic Press. New York, 428.

Lohse, L., Malschaert, J., Slomp, C., Helder, W. and Van Raaphorst, W., 1993. Nitrogen cycling in North Sea sediments: interaction of denitrification and nitrification in offshore and coastal areas. Mar. Ecol. Prog. Ser. 101:283-296.

Lomas, M. and Glibert, D., 1999. Interactions between NH_4^+ and NO_3^- uptake and assimilation: comparison of diatoms and dinoflagellates at several growth temperatures. Mar. Biol. 133 (3): 541-551.

Longhurst, A., Lorenzen, C., Thomas, W., 1967. The role of pelagic crabs in the grazing of phytoplankton off Baja California. Ecolog. 48 (2): 190-200.

Lynn y Simpson, 1987

Lluch-Belda D., Hernández-Rivas, M., Saldierna-Martínez, R. and Guerrero-Caballero, R., 2001. Variabilidad de la temperatura superficial del mar en Bahía Magdalena, BCS. Ocean. 15 (1): 1-23.

Makarov, V., 2005. CTD Profiles Preprocessing. Software para el tratamiento de los perfiles oceanográficos medidos con el CTD. Manuales, IPN-CICIMAR.V1.1.

Maksymowska, D. and Piekarek, H., 2001. Seasonal variability of benthic ammonium release in the surface sediments of the Gulf of Gdansk (southern Baltic Sea). Oceanolog. 43 (1): 113-136.

Millan-Nuñez, R., Ortiz-Cortés, F. and Álvarez-Borrego, S., 1981. Variabilidad espacial y temporal de nutrientes y fitoplancton en una laguna costera, a finales de verano. Cienc Mar. 7 (1):103-129.

Millero, F. J., 1996. Chemical oceanography. Second Edition. Florida. Press, Inc., 281-299.

Murillo-Jiménez, J. M., 1997. Sedimentary characteristics and chronology of halocene aeolian deposits of the central portions of the Purisima-Iray-Magdalena Basin, Baja California Sur, México. Tesis de Doctorado. University of Southern California, LA, USA. 347 p.

McCarthy, J.J., 1981. The kinetics of nutrient utilization. Physiological bases of phytoplankton ecology. *Can Bull Fish aquat Sci.* 210, 211-233.

Nienhuis, H. and Guerrero, R., 1985. A quantitative analysis of the annual phytoplankton cycle of Magdalena lagoon complex (México). *J. Plank. Res.* 7 (4): 427-441.

Nixon, W., Nelly, K., Furnas, B. and Ovita, C., 1980. Phosphorous regeneration and metabolism of coast marine bottom communities. In: Tenore, K. R. y B. Coull (Eds). *Marine Benthic Dynamics*. University of South of California Press. Columbia, S.C. ,219-242

Nogueira, E., Pérez, F., Ríos, A., 1997. Seasonal patterns and long-term trends in an estuarine upwelling ecosystem (Ria de VIGO, NW Spain). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 44: 285-300.

Obeso-Nieblas, M., Gaviño-Rodríguez, J. and Jiménez-Illescas, R., 1999. Modelación de la marea en el sistema lagunar Bahía Magdalena, B.C.S., México. *Ocean.* 14 (2): 79-88.

Palmer, D., Fredericks, D., Smith, C. and Heggie, D., 2000. Nutrients from sediments. *AGSO. Research Newsletter*, N° 30.

Palomares-Garcia R., Martinez-Lopez, A., De Silva-Davila, R., Funes-Rodriguez, R., Carballido-Carranza, A., Avendaño-Ibarra, R., Hinojosa-Medina, A. and Lopez-Ibarra, G., 2003. Biological effects of El Niño 97-98 in a shallow subtropical ecosystem. *Geofísica Internal.* 45 (3): 455-466.

Parsons, T., Maita, Y. and Lalli, C., 1984. A manual of chemical and biological methods for sea water analysis. Pergamon Press. Oxford. 173.

- Pilson, M. E., 1998. An Introduction to the Chemistry of the Sea. Prentice Hall press. 431.
- Redfield, A. C., 1934. On the proportions of organics derivatives sea water and their relation to the composition of plankton. In James Johnstone. Memorial Volumen (Daniel, R. J., editor), 176-192. University of Liverpool.
- Reid, J., Roden, I., Willie, J., 1958. Studies of the California Currents System. CalCOFI. Progress Report., 27-56.
- Robinson, J., Gómez-Gutiérrez, J., Felix-Uraga, R., Arenas-Fuentes, V., 2000. Seasonal hydro-acoustical observations of small pelagic fish behaviour in Bahía Magdalena, Mexico. Aquatic Living Resour [Aquat. Living Resour./Ressour. Vivantes Aquat]. 1:11-18.
- Rosales-Villa, A. R. 2004. Dinámica de nutrimentos en Bahía Magdalena, B.C.S., México. Tesis de Maestría. CICIMAR-IPN, La Paz, B.C.S., México. 104p.
- Salinas-González, F., Pinet-Plasencia, R., 1991. Geostrophic currents off Bahía Magdalena Baja California Sur, México. Invest. Mar. CICIMAR. 6 (2): 251-257.
- Sánchez-Montante, O., 2004. Hidrodinámica y transporte de masa en el sistema lagunar Bahía Magdalena-Bahía Almejas, Baja California Sur, México. Tesis Doctoral. CICIMAR-IPN, La Paz, B.C.S., México. 237 p.
- Sánchez-Rodríguez, I., Cervantes-Duarte, R., 1999. Longitud y biomasa de *Sargassum sinicola Stechell et Gardner* (Phaeophyta) en Bahía Magdalena, BCS., México. Hidrobiolog. 9 (2): 117-124.
- Shumilin, E., Rodríguez, D., Sapozhnikov, D., Lutsarev, S., Murillo de Nava, J., 2005. Arsenic Concentrations in the Surface Sediments of the Magdalena-Almejas Lagoon Complex, Baja California Peninsula, México. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 74: 493-500.
- Strickland, J. D. and Parsons, T. R., 1972. A practical handbook of seawater analysis. 2da. Ed. Boletín 167. Fish Res Board. 310

Syrett, P. J., 1981. Nitrogen metabolism in macroalgae. Physiological bases of phytoplankton ecology. *Can. Bull. Fish. Aquat. Sci.* 210, 182-210.

Sverdrup *et al.*, 1942

Taft, J. and Taylor, W., 1976. Phosphorus dynamics in some coastal plain estuaries. In: Wiley, M. (Ed). *Estuarine Process*. Academic Press, New York. 1:79-89.

Torres-Moye, G., and Acosta-Ruiz, M., 1986. Algunas propiedades químicas indicadoras de eventos de surgencias costeras y de la corriente subsuperficial en el área cercana a Punta Colonet, Baja California. *Cienc Mar.* 12 (3): 10-25.

Varela, M., Barquero, S., Bode, A., Fernández, E., González, N., Teira, E. and Varela, M. 2003. Microplanktonic regeneration of ammonium and dissolved organic nitrogen in the upwelling area of the NW of Spain: relationship with dissolved organic carbon production and phytoplankton size-structure. *J. Plankt. Res.* 25 (7): 719-736.

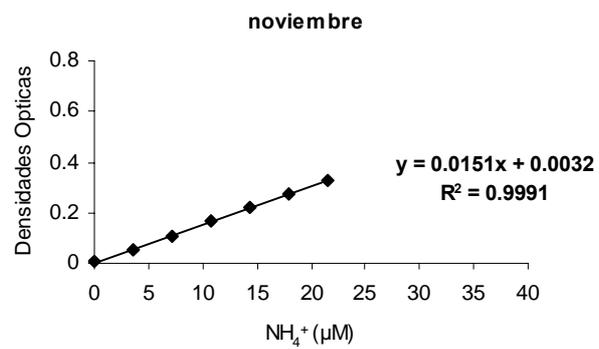
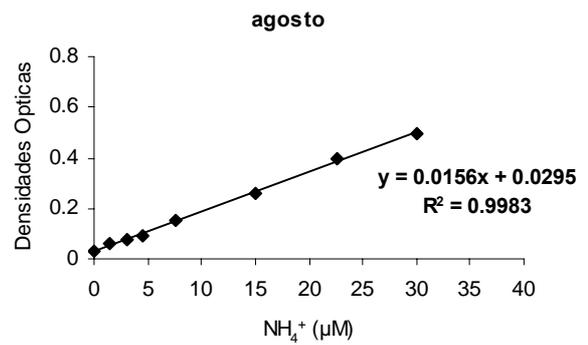
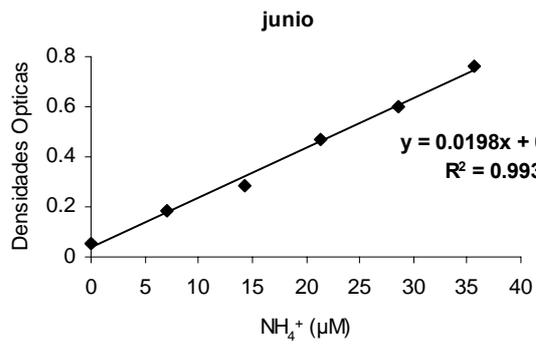
Zaytsev, O., Cervantes-Cervantes, R., Montante, O., and Gallegos-García, A., 2003. Coastal upwelling activity on the Pacific shelf of the Baja California peninsula. *J. Oceanogr.* 59: 489-502.

Zehr, J. and Ward, B., 2002. Nitrogen Cycling in the Ocean: New Perspectives on Processes and Paradigms. *Appl. Environ. Microbiol.* 68 (3): 1015-1024.

9. ANEXOS

9.1. Amonio:

Curvas de calibración del amonio en los diferentes meses de muestreos.



9.2. Prisma de Marea y Tiempo de Residencia:

La tabla III nos muestra los datos de prisma de marea y tiempo de residencia para BM. Los valores indican que el volumen total de agua que atraviesa la sección transversal de la boca de BM en cada flujo o reflujos de la marea (V_p) fue de 1.30 a 0.23 km^3 y el tiempo necesario para llenar todo el volumen de la bahía (τ_g) fue de 6 - 30 ciclos de marea durante la marea viva-muerta (Sánchez-Montante, 2005)

Tabla II. Valores de prisma de marea (V_p) y el tiempo de residencia (τ_g) en la fase de marea muerta y marea viva para Bahía Magdalena (Tomado de Sánchez-Montante, 2005).

Referencia Parámetros	R [m]	a [Km^2]	V_p [km^3]	$V - V_a$ [km^3]	Rango de profundidad[m]	τ_g [ciclos de marea]
Marea viva	2.3	565	1.30	6.80 – 8.10	14 – 14.3	≈ 6
Marea muerta	0.4	565	0.23	6.80 – 7.03	12 – 13	≈ 30

