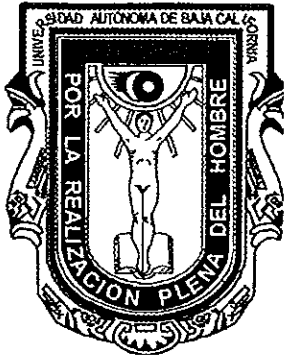


028733



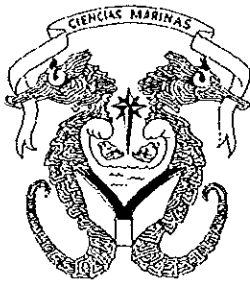
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE
BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
OCEANOLOGICAS

POSGRADO EN OCEANOGRAFIA COSTERA

"DISTRIBUCION ESPACIAL Y VARIABILIDAD TEMPORAL DE
NUTRIENTES EN EL GOLFO DE CALIFORNIA"

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE



MAESTRO EN CIENCIAS EN
OCEANOGRAFIA COSTERA



Presenta:

BIOL. SINHUE TORRES VALDES

Ensenada, B.C., México

Marzo del 2000.

COORD. DEL SISTEMA DE INFORMACION
ACADEMICA U.A.B.C.

028733

**"DISTRIBUCION ESPACIAL Y VARIABILIDAD TEMPORAL DE
NUTRIENTES EN EL GOLFO DE CALIFORNIA"**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN OCEANOGRAFIA COSTERA**

Presenta:

Biol. Sinhué Torres Valdés

Aprobada por:



**M. en C. Francisco Delgadillo Hinojosa
DIRECTOR**



**Dr. Víctor F. Camacho Ibar
SINODAL PROPIETARIO**



**M. en C. José Martín Hernández Ayón
SINODAL PROPIETARIO**

DEDICATORIA

a:

**Imelda Torres
Sharid Torres
María Valdés
Silvestre Torres †**

y a:

**Amanda Torres, Guadalupe Mercado, Rigoberto Torres
y Celia Torres.**

*Por que no les importó caminar con el sudor en la frente,
siempre tenían una dulce canción para silbar.*

17:16:19 21:16:04:16, 03:16:14 01:13:16:19 01 04:09:16:20 (A/27).

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, proyecto: "biogeoquímica de los elementos traza Al, Pb, Cd y Mn en el Golfo de California", clave 2511PT y beca: 119135, registro: 117672.

A la Universidad autónoma de Baja California, a la Facultad de Ciencias Marinas y al Instituto de Investigaciones Oceanológicas.

Al M. en C. Francisco Delgadillo Hinojosa; por la oportunidad de trabajar con él, su disponibilidad, atención y confianza.

Al Dr. Víctor F. Camacho Ibar; por su disponibilidad y atención, tanto en el desarrollo de mi trabajo como profesor.

Al M. en C. Martín Hernández Ayón; por su disponibilidad y atención, durante mi trabajo y a lo largo de la maestría.

A los M. en C. Amilcar Levi Cupúl Magaña y Fabio G. Cupúl Magaña (los Master); por su apoyo y amistad.

Al C.U.C. , U. de G.

Al Dr. Alberto Zirino, Dr. Vinicio Macias y Dr. Miguel Angel Huerta; por su atención, ayuda y apoyo.

A Angélica Arce, Irma Soria y Roberto Millán; por su atención y apoyo.

A Ignacio Gaona, Jaime Gaona y Rigoberto Torres; los mejores primates.

A Perrones Inc.: Pedro Medina, Jorge Fonseca, Fabián Rodríguez y Carlos Peynador; mi familia durante los últimos años (el poder de la miseria!).

A J. Alejandro Balbuena, Carmina Torres, Alejandra Cornejo, Helios Hernández y a Ana O. Méndez; los amigos de la vida.

A Camila.

A Carmelina González, Ana L. Pichardo, F. Salvador Gómez y Carlos Ibarra; Virus.

A Marisol López, Adriana Aguilar, Abraham Reyes, Gilberto Estrada, Karla Ching, Karina Pulido, Zoitza Martínez; VTA.

A Roberto Maruri, Edgardo Ramírez y Cesar Velázquez; MICH.

A Lorena Ríos, Mayra González, Rene Valdivia, Arturo Siqueiros, Sergio Jiménez y Pedro Castro; por su ayuda y amistad.

A Erick de la Barrera, Christian M. Appendini, Laura Dorantes, Liza Kelly, Luis Plata, Fausto Arellano, Nancy Ramírez, Dulce Partida, Fabiola Lafarga y Clara E. Galindo; grandes amigos.

A Lorax Consultores; apoyo excepcional.

A los de siempre y a los demás.

17:16:19 21:16:04:16, 03:16:14 01:13:16:19 01 04:09:16:20 (A/27).

Resumen

Se realizaron dos cruceros oceanográficos en el Golfo de California con el propósito de estudiar la distribución espacial y la variación temporal de nutrientes en este mar marginal. Un crucero se llevó a cabo en septiembre de 1996 como representativo de las condiciones de verano y otro en marzo de 1997 en condiciones de invierno. Para la toma de muestras se consideraron 21 estaciones distribuidas a lo largo y ancho del Golfo e incluyeron los diferentes regímenes hidrográficos característicos del mismo. Se encontraron valores de nutrientes en las capas superficiales mayores que los reportados para el Pacífico Norte. En general, las concentraciones superficiales de nutrientes aumentaron de sur a norte, con intervalos de 0.6 a 14.5 μM de nitratos y de valores no detectables a 1.7 μM de fosfatos. Las concentraciones más elevadas se presentaron en la región de las islas, mientras que las menores se presentaron en el sur. Con datos de concentración de nutrientes por unidad de área se estimó un enriquecimiento del 35-45% con nutrientes en invierno, respecto al verano. Mediante diagramas de mezcla se muestra que la región de las islas es una fuente de nutrientes hacia la superficie, en donde la mezcla vertical controla los parámetros físicos y químicos. Aproximadamente el 80% de la distribución vertical de nutrientes puede ser explicada con la salinidad en esta zona. Las figuras aquí presentadas sugieren que los nutrientes emergen en la región de las islas y que la circulación termohalina juega un papel importante en el transporte de estos materiales hacia la región centro-sur, donde son aprovechados por el fitoplancton. Se observó una relación inversa entre la concentración de nutrientes por unidad de área y el parámetro de estratificación (ϕ). Por ejemplo, en verano se observaron concentraciones >1300 mmoles m^{-2} de nitratos y >130 mmoles m^{-2} de fosfatos con valores de $\phi = \sim 120 \text{ J m}^{-3}$, mientras que con valores $\phi = \sim 380 \text{ J m}^{-3}$ las concentraciones fueron ~ 630 mmoles m^{-2} y ~ 100 mmoles m^{-2} de nitratos y fosfatos respectivamente. Se encontró una razón N:P promedio de 9 en invierno y de 12 en verano, las cuales son menores a la relación de Redfield de $\text{N}_{16}:\text{P}$. Sin embargo, estudios recientes muestran que las razones N:P bajas son comunes en mares marginales. Además, las razones observadas aquí, concuerdan con las provincias N:P del Pacífico Norte ($<14 \text{ mol mol}^{-1}$). Los procesos de denitrificación y la predominancia de diatomeas, son factores que pueden alterar la razón N:P en el Golfo de California. Finalmente, la información aquí presentada sugiere que en la parte centro-sur del Golfo, el comportamiento de nutrientes está preferencialmente controlado por el consumo fitoplanctónico, mientras que la mezcla vertical controla la distribución de nutrientes en la región de las islas y en las zonas adyacentes.

**DISTRIBUCION ESPACIAL Y VARIABILIDAD TEMPORAL DE
NUTRIENTES EN EL GOLFO DE CALIFORNIA**

Sinhué Torres Valdés

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ÁREA DE ESTUDIO	4
2.1. Descripción general.....	4
2.2. Circulación en el Golfo.....	5
2.3. Masas de agua del Golfo.....	6
3. HIPÓTESIS.....	8
4. OBJETIVO.....	8
5. MÉTODO.....	9
5.1. MÉTODO DE CAMPO Y LABORATORIO	9
5.2. ANÁLISIS DE DATOS	11
6. RESULTADOS.....	13
6.1. EJE CENTRAL DEL GOLFO	13
6.1.1. NO_3^-	13
6.1.2. PO_4^{3-}	14
6.1.3. Oxígeno.....	22
6.1.4. Temperatura.....	24
6.1.5. SALINIDAD.	24
6.1.6. Estratificación.....	29
6.2. ESTACIONES COSTERAS.....	29
7. DISCUSIÓN	36
7.1. GENERALIDADES.....	36
7.2. MEZCLA VERTICAL Y ADVECCIÓN	38
7.3. RAZÓN N/P.....	43
7.4. COMENTARIOS FINALES.....	51
7.5. RESUMEN	52
8. CONCLUSIONES.....	54
9. LITERATURA CITADA	55

LISTA DE FIGURAS

Número		Página
1	Área de estudio y localización de las estaciones de muestreo	10
2	Distribución vertical de nitratos en cuatro estaciones representativas del eje central del Golfo.	15
3	Isolíneas de nitratos a lo largo del eje central del Golfo.	16
4	Concentración de nitratos integrada en los primeros 100 m a lo largo del eje central del Golfo.	17
5	Distribución vertical de fosfatos en cuatro estaciones representativas del eje central del Golfo.	19
6	Isolíneas de fosfatos a lo largo del eje central del Golfo.	20
7	Concentración de fosfatos integrada en los primeros 100 m a lo largo del eje central del Golfo.	21
8	Distribución vertical de oxígeno en cuatro estaciones representativas del eje central del Golfo.	23
9	Distribución vertical de temperatura en cuatro estaciones representativas del eje central del Golfo.	25
10	Isotermas a lo largo del eje central del Golfo.	26
11	Distribución vertical de salinidad en cuatro estaciones representativas del eje central del Golfo.	27
12	Isohalinas a lo largo del eje central del Golfo.	28
13	Parámetro de estratificación (ϕ) a lo largo del eje central del Golfo.	30
14	Distribución vertical de nitratos en las estaciones costeras.	32
15	Distribución vertical de fosfatos en las estaciones costeras.	33
16	Distribución vertical de temperatura en las estaciones costeras.	34
17	Concentración de nutrientes integrada en los primeros 100 m vs Parámetro de estratificación (ϕ).	39
18	Diagramas de mezcla (nutriente-salinidad).	41
19	Razones N:P.	45

20	Distribución vertical de fosfatos comparados con datos de Hayward (1987) y distribución vertical de nitratos comparados con datos de Hayward (1987) y con datos de Bruland et al. (1994).	47
21	Ejemplo de la distribución vertical del déficit de nitratos (ΔNO_3^-).	49

Lista de Tablas

Número		Página
I	Características de temperatura y salinidad de las masas de agua del Golfo de California, tomada de Torres-Orozco (1993).	6
II	Concentraciones superficiales máximas de nitratos en verano e invierno; eje central del Golfo.	13
III	Concentraciones superficiales máximas de fosfatos en verano e invierno; eje central del Golfo.	18
IV	Promedios de la concentración de nutrientes integrada en los primeros 100 m en la costa de Baja California y en la costa de Sonora-Sinaloa.	31

1. INTRODUCCIÓN

Los mares marginales son considerados como zonas de gran importancia desde un punto de vista humano. Esto se debe a los beneficios que se obtienen de ellos, por ejemplo su utilización como: *a)* vías de transporte *b)* fuentes de alimento *c)* fuentes de recursos no renovables y *d)* fuentes de energía, entre otros (Jickells, 1998). No obstante, la importancia de estos ecosistemas va más allá del punto de vista humano.

A pesar de que cubren un área pequeña ($7\% \approx 26 \times 10^6 \text{ km}^2$) en relación con el océano mundial, los mares marginales representan el 90% de las pesquerías mundiales (Pauly y Christensen, 1995), contribuyen con el 14 - 30 % de la producción primaria oceánica (Gattuso *et al.*, 1998), el 50 % de la denitrificación global oceánica y el 80 % del enterramiento de materia orgánica (Pernetta y Milliam, 1994). Los mares marginales constituyen una de las zonas más activas geoquímica y biológicamente con relación al resto de la biosfera. Esto es porque reciben cantidades considerables de materia orgánica y nutrientes de los continentes e intercambian energía y materia con el océano abierto, los sedimentos y la atmósfera (Gattuso *et al.*, 1998; Ortiz-Cárdenas, 1998). Lo anterior sugiere que el papel que juegan los mares costeros en los ciclos biogeoquímicos es trascendental (e.g. Walsh, 1991).

La importancia de los mares costeros en los ciclos biogeoquímicos se refleja en el interés que se ha puesto en ellos. Incluso económicamente se les ha otorgado un valor alto con relación al reciclaje y almacenamiento de nutrientes (principalmente nitrógeno y fósforo) (Constanza *et al.*, 1997). Actualmente existen grupos de trabajo cuyo objetivo principal es el de generar información sobre los procesos físicos, químicos y biológicos que regulan, de manera general, el funcionamiento de los ecosistemas costeros en el planeta (e.g. LOICZ, ELOISE). Sus trabajos están enfocados a entender el funcionamiento de los ciclos de los elementos esenciales para la vida (C, N y P), por lo cual realizan estudios sobre los procesos biogeoquímicos que afectan su comportamiento en las zonas costeras (Holligan y de Boois, 1993; Smith *et al.*, 1997).

Se sabe que además de la luz, la disponibilidad de nutrientes mantiene y controla la productividad primaria marina (e.g. Nixon *et al.*, 1986; Falkowski *et al.*, 1998;

Mullineaux, 1999). El comportamiento, distribución y por lo tanto la disponibilidad de los nutrientes en los mares marginales, son el resultado de la interacción de diversos procesos físicos y biológicos que operan en diferentes escalas de tiempo y espacio. Como ejemplo se pueden citar los siguientes: *i*) procesos de advección, surgencias, mezcla de la columna de agua, aporte por ríos y *ii*) fotosíntesis y remineralización (e.g. Demers *et al.*, 1986; Fonselius, 1996; Radenac y Rodier, 1996; Delgadillo-Hinojosa *et al.*, 1997; Chavez *et al.*, 1998; Verity *et al.*, 1998; Williams y Follows, 1998). Tal situación sugiere que los estudios enfocados a entender el comportamiento de los nutrientes, deben considerar la relación que existe entre los procesos físicos y biológicos en un ecosistema determinado.

El Golfo de California (GC) es un mar marginal altamente productivo. Puede compararse con algunas de las zonas más productivas del planeta, como Bahía de Bengala, las zonas de surgencias en la Costa del Pacífico de Baja California o las del Norte de África. La productividad en el Golfo es dos o tres veces mayor que la del Atlántico y la del Pacífico, a latitudes similares (Zeitzchel, 1969, citado por Alvarez-Borrego, 1983). Los valores de productividad primaria en el Golfo comúnmente son $>1 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($> 80 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) y pueden llegar a ser $>4 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($>330 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). Se piensa que la productividad en este mar marginal se debe en gran medida al aporte continuo de nutrientes (Alvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991). Las concentraciones de nutrientes dentro del GC son elevadas con relación a las que se han encontrado en el océano Pacífico Norte. Por ejemplo, Hayward (1987) y Bruland *et al.* (1994) encontraron concentraciones cercanas a los límites de detección en los primeros 100 m de la columna de agua en el Pacífico Norte (28° N , 155° W en ambos trabajos). El primer autor lo observó tanto para nitratos como para fosfatos. En contraste, las concentraciones de nutrientes en el Golfo se incrementan rápidamente con la profundidad; se pueden encontrar valores de $2.3\text{-}2.5 \text{ }\mu\text{M}$ y $25 \text{ }\mu\text{M}$ de fosfatos y nitratos respectivamente, en los primeros 100 m (Alvarez-Borrego *et al.*, 1978). En general, se ha observado que los nutrientes en el Golfo no son un factor limitante para la productividad primaria, ya que siempre se han encontrado por arriba de la concentración que en la literatura se reporta como limitante para la fotosíntesis (Gaxiola-Castro y Alvarez-Borrego, 1986; Lara-Lara y Valdéz-Holguín, 1988). Este hecho destaca la relevancia del

enriquecimiento con estos materiales en sus aguas. Las concentraciones elevadas de nutrientes en el Golfo aparentemente son producto de la hidrodinámica del mismo, considerada única respecto a otros mares marginales (e.g. Alvarez-Borrego y Lara-Lara; 1991). Por ello, el propósito del presente trabajo es el de evaluar la distribución espacial y la variación temporal de nutrientes, con el fin de entender su relación con los procesos físicos que predominan en el lugar.

Existen ya trabajos en el GC que muestran la influencia de los procesos físicos sobre ciertas variables. Por ejemplo, Alvarez-Borrego y Gaxiola-Castro (1988) mencionan que sus datos parecen indicar que la turbulencia moderada provoca valores mayores en parámetros fotosintéticos, como son el número de asimilación o capacidad fotosintética (P^B_m) y la eficiencia fotosintética (α^B). Lara-Lara *et al.* (1993) observaron que el dominio del nanofitoplancton sobre el microfitoplancton en estaciones del Golfo central, fueron producto de condiciones estables de la columna de agua y que la productividad y concentración de clorofila *a* mayores, se encontraron en estaciones costeras, donde la columna de agua presentó condiciones de inestabilidad. Gaxiola-Castro *et al.* (1995) indicaron que la productividad primaria más alta en las estaciones centro-sur de su trabajo ($130 - 350 \text{ mg C m}^{-2} \text{ h}^{-1} = 10.8 - 29.1 \text{ mmol C m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), estuvieron asociadas con condiciones de estratificación y mezcla moderada de la columna de agua ($20 < \phi < 60 \text{ J m}^{-3}$). Hidalgo-Gonzalez *et al.* (1997) mencionan que la mezcla en la región de las grandes islas constituye un componente de la “bomba física” que transporta CO_2 de profundidades intermedias ($\sim 500 \text{ m}$) a la zona eufótica y a la atmósfera continuamente, todo el año y con modulación quincenal. Por otro lado, Cortés-Lara *et al.* (1999) contrastaron dos zonas diferentes del Golfo con relación al régimen de mezcla por mareas: la región de las grandes islas y la boca. Ellos atribuyen los valores bajos de concentración de nutrientes en la boca a la ausencia de mezcla por mareas. Delgadillo-Hinojosa *et al.* (1997) encontraron una relación positiva entre el parámetro de estratificación de la columna de agua (ϕ) y el gradiente de nitratos en una bahía localizada en el borde del Canal de Ballenas. Sus resultados sugieren que la mezcla vertical inducida por el viento es el principal control del gradiente, aunque no de la disponibilidad del

nutriente para la productividad de la bahía. También detectó que el incremento en la biomasa del fitoplancton durante su estudio, se debió a que el fitoplancton se desarrolló mejor bajo condiciones de estratificación.

Las variables estudiadas en los trabajos recién mencionados se relacionan estrechamente con los nutrientes. Este hecho sugiere que el comportamiento de los nutrientes en el Golfo también debe estar regulado en cierta medida por procesos físicos.

El flujo subsuperficial (200-500 m) del Pacífico hacia el interior del Golfo, como resultado de la circulación termohalina, aporta agua rica en nutrientes y sólo se requiere de algún mecanismo que los transporte a la superficie. Aparentemente, *i)* los procesos de surgencia en la costa; *ii)* la mezcla vertical en la región de las islas y *iii)* la circulación termohalina, constituyen un suministro continuo de nutrientes (e.g. Gaxiola-Castro *et al.*, 1999). Partiendo de este escenario y sin dejar de considerar a los procesos biológicos, surge la pregunta que se pretende resolver con el presente estudio: ¿Cuáles son los procesos que controlan el comportamiento y distribución de los nutrientes (nitrato y fosfato) en el Golfo de California?

2. ÁREA DE ESTUDIO

Con el fin de entender de manera general la dinámica del GC, se hace una descripción breve a continuación.

2.1. Descripción general.

El Golfo de California se localiza en la costa noroeste del Pacífico Mexicano (Argote y Lavín, 1998). Mide aproximadamente 1000 km de largo y de 100 a 200 km de ancho. Se encuentra separado del Océano Pacífico, y su clima está influenciado fuertemente por las tierras áridas que lo rodean, como consecuencia es la cuenca de evaporación más grande del Pacífico (Badán-Dangón *et al.* 1985). La batimetría del Golfo es variable, consiste de una serie de cuencas profundas separadas por umbrales de distintas profundidades. Considerando la batimetría se ha hecho una división de dos partes en el Golfo: de la boca (23° N) a la región de las grandes islas, con más de 2000 m

de profundidad y de la región de las islas a la cabeza del Golfo, con una plataforma continental de profundidad < 200 m el 75 % de su área. Esta separación se define por el umbral sur (450 m prof.) de la Cuenca de Salsipuedes (1600 m Prof.), que limita la circulación del agua profunda del Canal de Ballenas y de la parte sur del Golfo (Alvarez-Borrogo y Schwartzlose, 1979; Bray y Robles, 1991). La región sur se encuentra comunicada permanentemente con el Océano Pacífico. Los umbrales entre las cuencas en esta región, tienen profundidades de más de 1500 m.

2.2. Circulación en el Golfo.

La pérdida neta de calor y humedad a la atmósfera en cuencas de evaporación como el Mar Rojo Mar y el Mediterráneo, genera agua más densa que se hunde, provocando una circulación con entrada de agua por la superficie y salida por el fondo. No obstante, a pesar de que la evaporación en el GC es comparable con la de estos mares marginales (1 m año^{-1}), en el Golfo existe una ganancia neta de calor (Bray, 1988a; Lavín y Organista, 1988; Castro *et al.*, 1994), cuyo efecto sobre la densidad es más importante que la pérdida de agua. Esto produce una capa superficial de agua salina, caliente y menos densa que resulta en una circulación similar a la de un "estuario termal". De esta manera, el agua ligera sale por la superficie y el agua más densa entra por el fondo (Bray, 1988a,b; Lavín y Organista, 1988). Como consecuencia de la circulación en el Golfo, éste exporta sal y calor al océano Pacífico por la superficie y recibe agua fría rica en nutrientes por el fondo.

En la superficie, la circulación parece tener una señal estacional que responde al patrón de vientos, los cuales provienen del noroeste en invierno y son más intensos que los del sudeste, que se presentan en verano (Badán-Dangón *et al.*, 1991; Bray y Robles, 1991). El resultado es un flujo hacia el sur durante las estaciones de otoño e invierno y hacia el norte durante primavera y verano (Rosas-Cota, 1976; Marinone y Ripa, 1988).

Bray (1988a) propuso un modelo de circulación basado en estas observaciones. Dicho modelo está compuesto por la circulación termohalina y la corriente superficial. En él se consideran tres capas: una superficial hasta los 50 m, la cual fluye estacionalmente hacia dentro o hacia fuera del Golfo de acuerdo al patrón de vientos dominante; una capa

intermedia (50 - 250 m) que fluye hacia fuera y por último, una capa profunda (250 - 500 m) que fluye al interior del Golfo.

2.3. Masas de agua del Golfo.

En la entrada del Golfo existen tres masas de agua superficial: agua fría de baja salinidad de la Corriente de California (ACC) que fluye hacia el sur a lo largo de la costa oeste de la península; agua cálida del Pacífico Oriental Tropical (AST o ASE) de salinidad intermedia que fluye del sureste y agua caliente y salina del Golfo de California (AGC). Por debajo se encuentran las masas de agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt) que se caracteriza por un máximo de salinidad de aproximadamente 34.80 y la masa de Agua Intermedia del Pacífico (AIP) (Alvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979; Bray, 1988b; Bray y Robles, 1991). En el promedio anual, el 74 % del volumen total del Golfo de California se ocupa por las masas de agua más profundas: el AIP contribuye con el 33% y el APP con el 41 % (Tabla 1). El volumen restante lo ocupan tres masas de agua: el ASsSt (19 %), el AGC (6 %) y el ASE (1 %) (Torres-Orozco, 1993) (Tabla 1). La contribución del ACC al volumen total del Golfo es reducida.

Tabla (I). Características de temperatura y salinidad de las masas de agua del Golfo de California, tomada de Torres-Orozco (1993).

Masa de agua	Abr.	Temperatura °C	Salinidad	Volumen %
1) A. del Golfo de California	AGC	> 12	> 35	6
2) A. Superficial Ecuatorial	ASE	> 18	< 35	1
3) A. de la Corriente de California	ACC	12 - 18	< 34.5	-
4) A. Subsuperficial Subtropical	ASsSt	9 - 18	34.5 - 35	19
A. Intermedia del Pacífico	AIP	4 - 9	34.5 - 34.8	33
A. Profunda del Pacífico	APP	< 4	>34.5	41

Las masas de agua profundas del Pacífico (AIP y APP) no muestran variaciones estacionales apreciables en términos volumétricos (Torres-Orozco, 1993). El AIP se localiza de 600 a 900 m de profundidad, el APP a 1200 m y su distribución espacial se

restringe al sur del umbral de Salsipuedes. En contraste, durante el invierno las masas de agua Superficial del Pacífico Oriental Tropical y la Subsuperficial Subtropical se presentan sólo en la boca del Golfo, mientras que al final de la primavera, verano y otoño estas masas de agua invaden todo el Golfo hasta el sur de la isla Ángel de la Guarda (Alvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979).

La circulación termohalina del Golfo implica que los procesos de transformación de masas de agua conviertan a las de agua profunda en masas de agua someras (AGC) (Bray, 1988a). La transformación de masas de agua aparentemente es producto de varios procesos: *i)* hundimiento convectivo de aguas superficiales, *ii)* advección del agua formada, *iii)* circulación horizontal, que transporta agua de alta salinidad alejándola de la región del delta del Colorado y *iv)* mezcla por mareas (Bray, 1988b). Al parecer, el proceso transformador más importante es la mezcla por marea en la región de las islas (Bray y Robles, 1991).

Bray (1988b), sugiere que la formación de AGC ocurre de la siguiente forma. Durante el verano en la región norte del Golfo, la intensa evaporación eleva la salinidad del agua y produce Agua del Golfo del Norte (AGN). La agitación vertical intensa provocada por la marea en las vecindades del umbral sur de Salsipuedes promueve la mezcla de agua caliente y muy salina del Golfo Norte con el agua de menor salinidad subyacente (ASS), incluyendo un componente de agua fría y de baja salinidad de la AIP que se encuentra justo abajo de la profundidad del umbral (Bray, 1988b; Torres-Orozco, 1993; Simpson *et al.* 1994). Esta mezcla genera la masa de agua del Golfo de California, cuya característica es su alta salinidad (> 35.00). Eventualmente esta masa de agua se intercambia con el océano Pacífico.

3. HIPÓTESIS

Con base en los datos históricos y en las tendencias observadas en los datos preliminares del presente trabajo, se planteó la hipótesis siguiente.

La distribución espacial y la variación estacional de los nutrientes en el Golfo de California se encuentran influenciadas principalmente por procesos físicos en la región de las grandes islas e influenciadas principalmente por procesos biológicos en la parte centro-sur.

4. OBJETIVO

Evaluar la distribución espacial y la variación estacional de los nutrientes NO_3^- y PO_4^{3-} en el Golfo de California, con el propósito de contribuir al entendimiento de las fuentes y procesos que regulan el comportamiento de estos materiales dentro de éste mar marginal.

5. MÉTODO

5.1. Método de campo y laboratorio

Se llevaron a cabo dos cruceros que incluyen las épocas más características de los procesos físicos del Golfo (Santamaría-del-Angel *et al.*, 1994), uno del 15 al 27 de septiembre de 1996 como representativo de las condiciones de verano y otro del 11 al 22 de marzo de 1997 como representativo de las condiciones de invierno. Ambos cruceros se realizaron en un transecto paralelo al eje principal del Golfo con 21 estaciones (Fig. 1). Algunas estaciones se situaron cerca de la costa con el fin de detectar posibles procesos de surgencia. En cada estación se tomaron muestras en la superficie y en la profundidad, a 0, 5, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 200, 300, 500, 700, 1000 y 1500 m según lo permitiera la batimetría. El transecto incluyó los diferentes regímenes hidrográficos presentes en el Golfo (mezcla vertical en las grandes islas y estratificación en el sur). Además, se consideraron también las diferentes masas de agua.

La toma de muestras de agua a las diferentes profundidades propuestas para nutrientes, se hicieron con botellas Niskin de 5 L. En la superficie fueron filtradas a través de filtros GF-F de $.45 \mu\text{m}$ de poro previamente calcinados, lavados en HCl al 10 % y enjuagados en agua deionizada para evitar contaminación por materia orgánica. Más tarde, el agua de mar filtrada se colectó en botellas de polipropileno de 250 mL que fueron congeladas para su análisis en el laboratorio.

Cada grupo de muestras fue descongelada con agua corriente. Los análisis de nutrientes fueron llevados a cabo inmediatamente después, siguiendo las indicaciones descritas por Strickland y Parsons (1972). Con el fin de evitar cualquier tipo de contaminación que pudiese alterar el contenido de las muestras, todo el material de laboratorio fue previamente lavado con detergente líquido libre de fosfatos, enjuagado con HCl al 10 % y con agua deionizada cada vez que se hizo un análisis. La concentración de nitratos que se reporta es: $\text{NO}_3^- = [\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-]$.

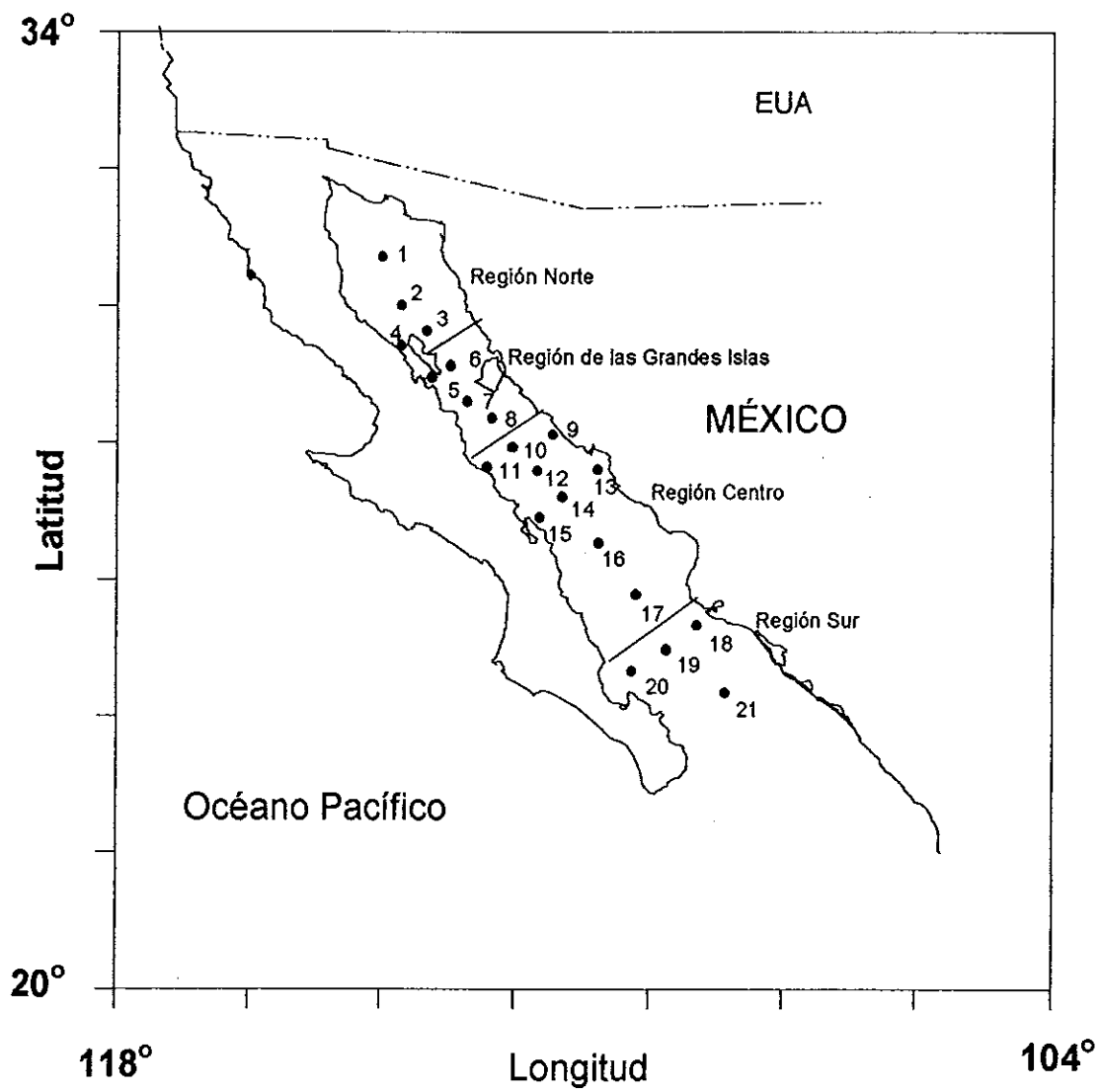


Figura 1. Área de estudio y localización de las estaciones de muestreo. Se muestran las divisiones del Golfo que se mencionan en el texto.

5.2. Análisis de datos

Se hizo un análisis gráfico de los gradientes verticales y horizontales de nutrientes, que permitió identificar los rasgos principales de su distribución en el Golfo.

Se hizo un análisis gráfico de la hidrografía del lugar siguiendo el criterio de Torres-Orozco (1993), con el fin de identificar el origen de las masas de agua muestreadas. De la misma forma se identificaron los gradientes horizontales y verticales que permitieron caracterizar los diferentes regímenes hidrográficos presentes en el Golfo.

Para establecer la relación entre la distribución de los nutrientes y la mezcla vertical de la columna de agua, se calculó el parámetro de estratificación de la columna de agua (ϕ) a lo largo del Golfo, con base en la ecuación descrita por Simpson y Bowers (1981):

$$\phi = \frac{g}{h} \int_{-h}^0 [(\rho^* - \rho(z))]z dz; \quad (1)$$

$$\rho^* = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 \rho(z) dz; \quad (2)$$

Donde ρ es la densidad del agua, ρ^* es la densidad media a la profundidad de la columna de agua, g es la aceleración por la gravedad, h es la profundidad de la columna de agua y z es la coordenada vertical. Así, para un sistema verticalmente mezclado $\phi = 0$ y se incrementa en proporción a la estratificación. El parámetro se obtuvo para los primeros 100 m, que es la profundidad aproximada de la capa de mezcla de columna de agua observada en el Golfo (Lavín *et al.*, 1997). Además, es la profundidad a la cual se obtuvieron el mayor número de muestras para nutrientes.

Se utilizaron diagramas de mezcla con el fin de entender el efecto de los procesos de mezcla sobre la distribución de nutrientes.

A la fecha no existe una división por regiones en el Golfo, cuyas características coincidan con el comportamiento de las diferentes variables en su conjunto. Sin embargo, tomando en cuenta las observaciones de algunos trabajos, es posible distinguir de una

manera general, cuatro regiones en el Golfo. Así, tomando en cuenta además los resultados preliminares del presente trabajo, para la descripción de los datos se consideró al GC en (Fig. 1): 1) región norte (estaciones 1 a 3); es una zona somera que se encuentra aislada de la mayor porción del golfo por un archipiélago de islas y está influenciada fuertemente por el efecto de las mareas, 2) región de las grandes islas (estaciones 6 a 8); es la parte más estrecha del Golfo, caracterizada por la presencia de agua fría en la superficie durante todo el año debido a procesos de mezcla vertical, 3) región centro (estaciones 10 a 17); es una zona en la que se reflejan el efecto de los procesos de la región de las islas y los procesos que ocurren más al sur; se caracteriza por presentar condiciones de estratificación en la columna de agua y por último, 4) la región sur (19 y 21), es una zona en la que ocurre el intercambio de agua entre el Golfo y el Océano Pacífico Oriental Tropical, en ella se aprecia la gran influencia de éste último.

Se eligieron cuatro estaciones del eje central como representativos de cada zona. De estas estaciones se presentan gráficos de distribución vertical, que incluyen los primeros 100 m (que es la profundidad a la cual se tomaron más muestras). De esta forma, la estación No. 1 (E1) representa la región norte, la E7 la región de las islas, la E12 la región centro y la E19 la región sur. Sin embargo, debido a la variabilidad, se hace hincapié en datos sobresalientes.

En el texto, para hacer referencia a las regiones en que se dividió al golfo, se utilizaron las palabras región, parte y zona, de manera indistinta. De igual forma, para evitar repititividad, se utilizan Golfo de California, Golfo y GC de manera indistinta.

Algunos gráficos hacen referencia a la distancia que hay entre la primera y última estación del eje central. Se designó el km 0 a la E1, con lo cual, la distancia hasta la E21 es de ~898 km.

6. RESULTADOS

6.1. Eje central del Golfo.

6.1.1. NO_3^-

En ambos cruceros las concentraciones superficiales más altas de nitratos se encontraron en la región de las islas. En invierno se observó una tendencia general en el intervalo de concentraciones superficiales de aumentar en valor de la boca del Golfo hacia la región de las islas (Tabla II). En verano la situación fue diferente; el intervalo de concentraciones superficiales en la parte sur presentó valores mayores que en la región centro (Tabla II). Tomando en cuenta la presencia oligotrófica del ASE durante esta época, la observación anterior sugiere que la actividad biológica en la parte central es importante. Finalmente, el intervalo de concentraciones superficiales de la parte norte presentó valores similares a los de la región centro.

Tabla (II). Intervalo de concentraciones superficiales de nitratos en verano e invierno; eje central del Golfo ($\mu\text{moles L}^{-1}$).

	NO_3^-	
	verano	invierno
Región norte	nd - 2.5	1.9 - 5.8
Región de las islas	2.2 - 4.8	6.3 - 14.5
Región centro	nd - 1.5	1.3 - 9.7
Región Sur	0.2 - 4.6	nd - 5.9

El intervalo incluye valores de 0 y 10 m.

nd: valores no detectados con el método utilizado.

Los nitratos presentaron un perfil típico de distribución tipo nutriente, muy marcado en los primeros 100 m. Esta distribución se caracterizó por valores que aumentaron gradualmente con la profundidad, desde $17.6 \pm 3.3 \mu\text{M}$ a 100 m hasta $38.1 \pm 1.7 \mu\text{M}$ a 1500 m. Las concentraciones más altas se encontraron en la región de las

islas, mientras que las menores se encontraron en la parte sur. En ambos cruceros la estación 7 (E7) se identificó por presentar concentraciones elevadas a lo largo del perfil vertical. La figura 2 muestra los perfiles verticales de cuatro estaciones representativas del eje central del Golfo. Se observa que la nutriclina fue más somera en invierno (5 m) que en verano (10-30 m). También, se aprecia que en invierno existe un enriquecimiento con este nutriente en las capas superficiales del Golfo (0-300 m) y que es más notorio en los primeros 100 m.

Las isolíneas de nitratos presentan en común una estructura en forma de domo en la región de las islas (figura 3). Esta estructura sugiere que la región de las islas funciona como una fuente de nutrientes. En verano se observa claramente la disminución de la concentración de nutrientes desde la región de las islas hacia la boca del Golfo. En invierno sobresalen un par de estructuras en forma de domo, similares a la que se observa en la región de las islas. Al comparar las isolíneas de ambos cruceros, es visible el enriquecimiento con el nutriente en el invierno. Las isolíneas de mayor concentración se encuentran más cerca de la superficie (e.g. 13.5 μM).

En la figura 4 se presentan los valores de concentración integrada de nitratos en los primeros 100 m. Se observa que la región de las islas presentó la concentración más alta de nitratos por unidad de área. En verano, la concentración mayor se observó en la E8 (1, 450 mmoles m^{-2}), mientras que en invierno se observó en la E7 (1, 593 mmoles m^{-2}). En invierno se presentaron dos picos en la zona central, correspondientes a las E14 y E17 (1, 310 y 1, 135 mmoles m^{-2} respectivamente).

6.1.2. PO_4^{3-} .

Al igual que los nitratos, las concentraciones superficiales de fosfatos más altas se encontraron en la región de las islas. En invierno también se observó la tendencia en el intervalo de concentraciones de aumentar en valor hacia la región de las islas (tabla III). De forma consistente con los nitratos, en verano el intervalo de concentraciones superficiales en la región centro presentó valores menores que en la región sur (Tabla III); hecho que sugiere la importancia de la actividad biológica en la parte centro

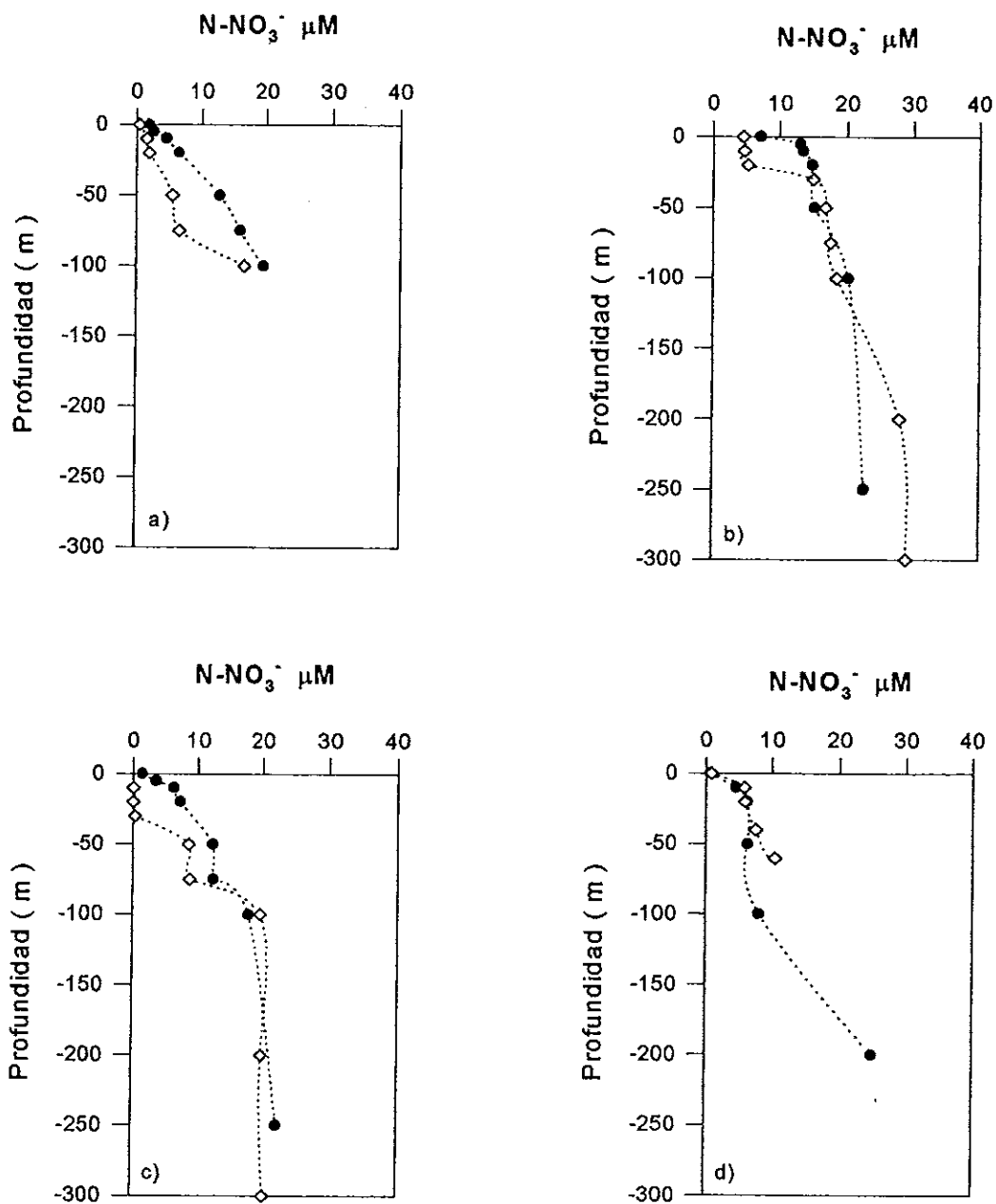


Figura 2. Distribución vertical de nitratos en cuatro estaciones representativas del eje central. a) E1; b) E7; c) E12; d) E19. ◇ verano; ● invierno.

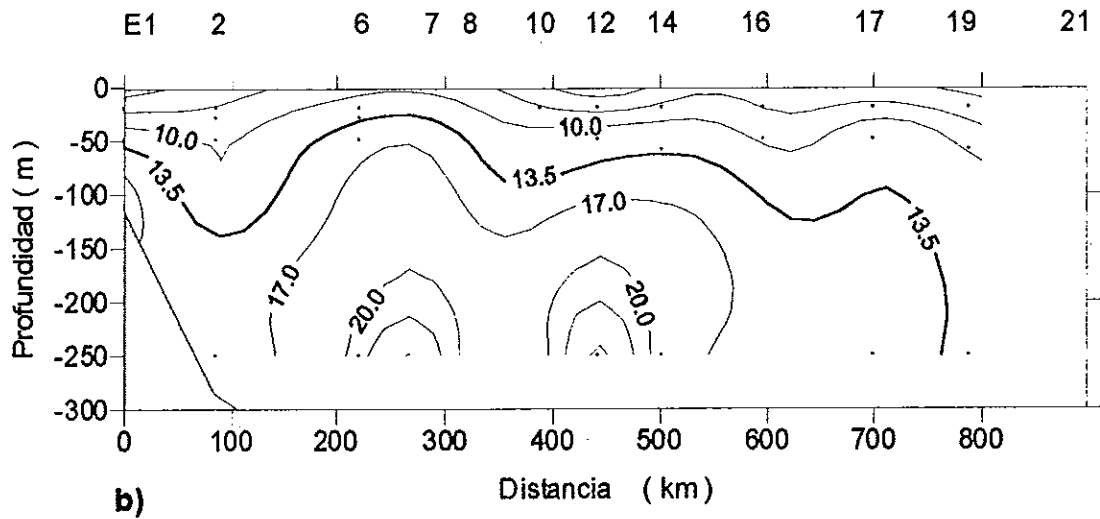
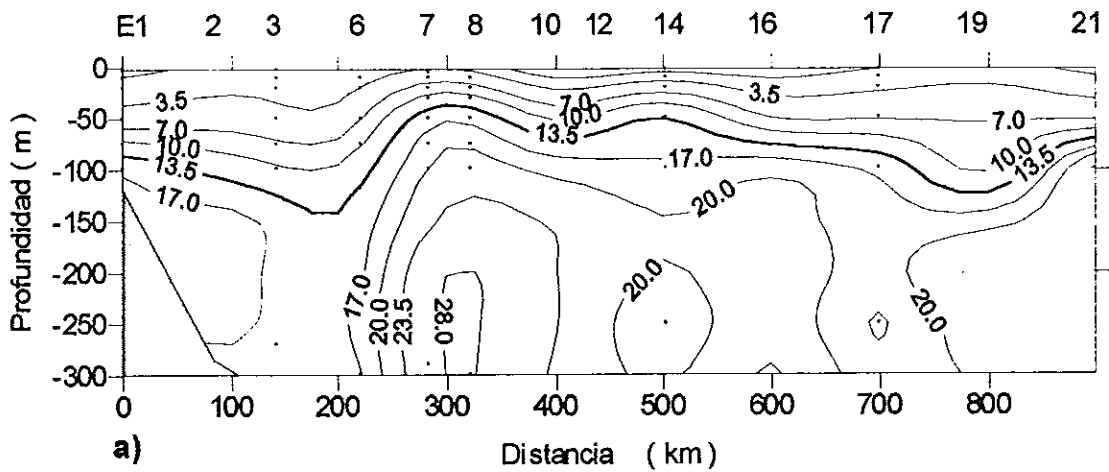


Figura 3. Isolíneas de nitratos a lo largo del eje central del Golfo. a) verano; b) invierno. Los números en la parte superior corresponden a los números de las estaciones de la figura 1. La distancia está referida a la estación 1. Nota: en invierno se excluyen los datos de la E21, ya que sólo se cuenta con valores superficiales.

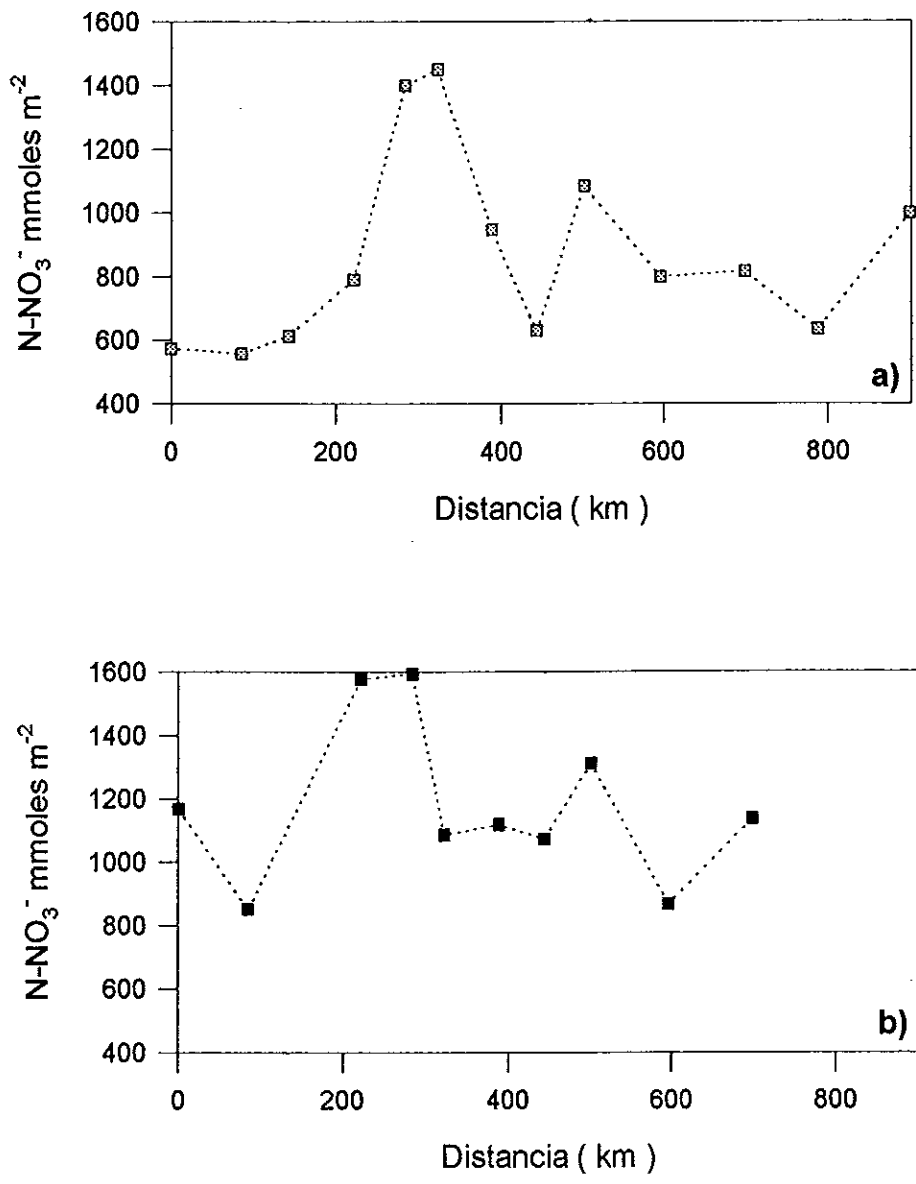


Figura 4. Concentración de nitratos integrada en los primeros 100 m a lo largo del eje central del Golfo. a) verano; b) invierno. La distancia está referida a la estación 1.

del Golfo. El intervalo de concentraciones superficiales de fosfatos en la región norte, también presentó valores similares a los que se presentaron en la región centro.

Tabla (III). Intervalo de concentraciones superficiales de fosfatos en verano e invierno; eje central del Golfo ($\mu\text{moles L}^{-1}$).

	PO_4^{3-}	
	Verano	invierno
Región norte	nd - 0.6	0.8 - 1.0
Región de las islas	0.5 - 0.8	0.9 - 1.7
Región centro	nd - 0.4	0.5 - 1.3
Región Sur	0.2 - 1.0	0.2 - 0.7

El intervalo incluye valores de 0 y 10 m.
nd: no detectable con el método utilizado.

También los fosfatos presentaron un perfil típico de distribución tipo nutriente, muy marcado en los primeros 100 m. El aumento gradual de la concentración con la profundidad fue de $1.9 \pm 0.3 \mu\text{M}$ a 100 m, hasta 2.9 ± 0.1 a 1500 m. La tendencia es la misma que la de los nitratos. Las concentraciones mayores se encontraron en la región de las islas y las menores en la parte sur. En la E7 se encontraron las concentraciones más elevadas. En la figura 5 se muestran los perfiles verticales de fosfatos de cuatro estaciones representativas del eje central del Golfo. Los perfiles de fosfatos son consistentes con los de nitratos. Es visible también el enriquecimiento con fosfatos en invierno. El patrón que presentan las isolíneas de fosfatos concuerda con el que presentan los nitratos. Es evidente el suministro de nutrientes en la región de las islas (figura 6). La concentración de fosfatos disminuye de la región de las islas hacia la boca, sugiriendo consumo por fitoplancton. El hecho de que las isolíneas de mayor concentración se encuentren más cerca de la superficie en invierno, remarca el enriquecimiento con nutrientes en esta época (e.g. isolínea de $1.5 \mu\text{M}$). Los valores integrados de fosfatos se presentan en la figura 7. La región de las islas presenta el mayor contenido de fosfatos. En verano, el valor mayor se observó en las E8 ($139 \text{ mmoles m}^{-2}$)

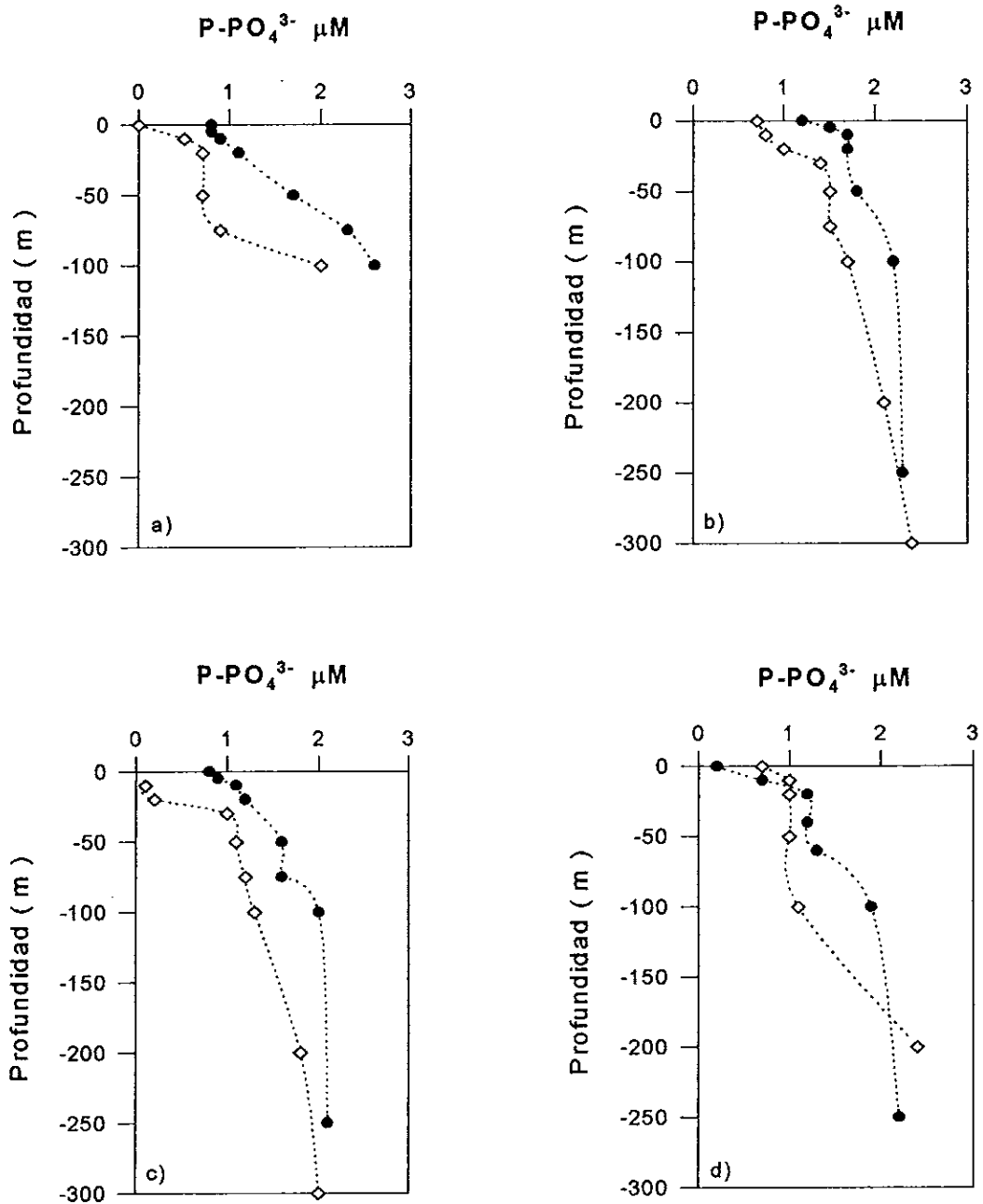


Figura 5. Distribución vertical de fosfatos en cuatro estaciones representativas del eje central. a) E1; b) E7; c) E12; d) E19. \diamond verano; \bullet invierno.

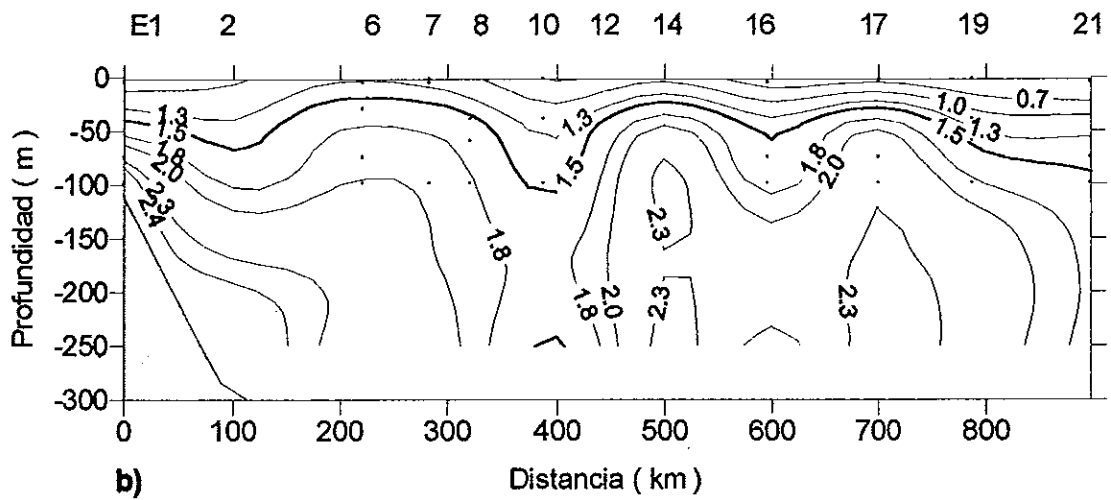
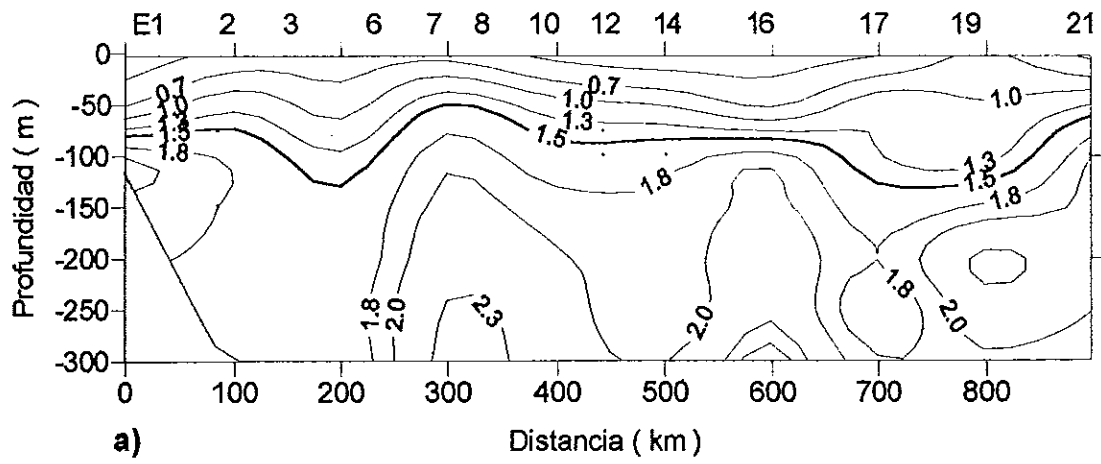


Figura 6. Isolíneas de fosfatos a lo largo del eje central del Golfo. a) verano; b) invierno. Los números en la parte superior corresponden a los números de las estaciones de la figura 1. La distancia está referida a la estación 1.

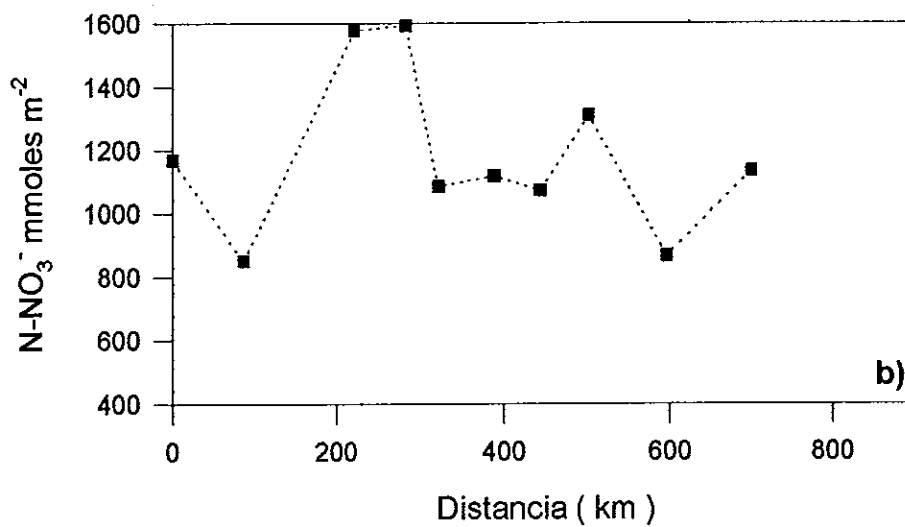
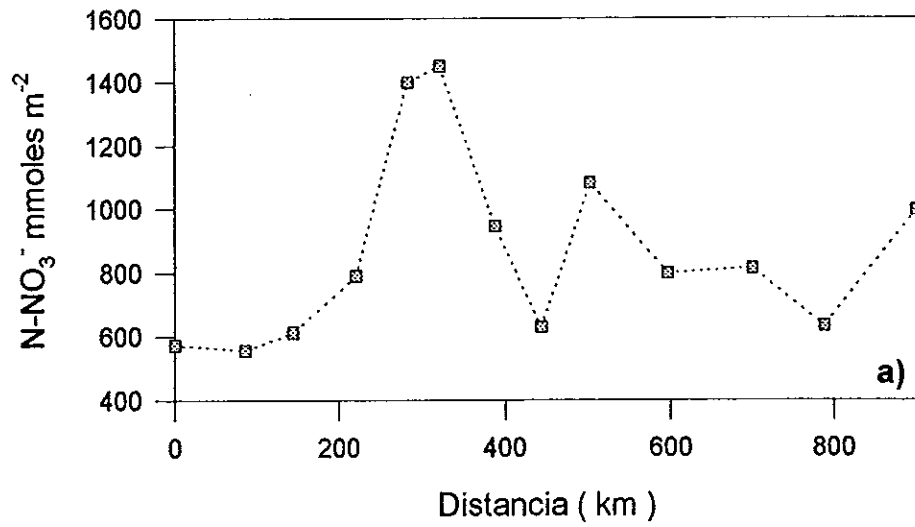


Figura 7. Concentración de fosfatos integrada en los primeros 100 m a lo largo del eje central del Golfo. a) verano; b) invierno. La distancia está referida a la estación 1.

y en invierno en la E7 (184 mmoles m^{-2}). Los picos que se presentan en la parte central central en invierno, concuerdan con las estructuras en forma de domo en las isolíneas de fosfatos. Estos picos corresponden a las E14 y E17 (201 y 185 mmoles m^{-2} respectivamente).

6.1.3. Oxígeno.

El oxígeno presentó valores similares a los reportados en la literatura. El comportamiento del oxígeno fue típico, con concentraciones elevadas en la superficie que disminuyen hacia el fondo. La figura 8 muestra los rasgos más sobresalientes en los primeros 300 m de profundidad en cuatro estaciones representativas del eje central del Golfo. La figura 8(b) refleja claramente el efecto de la mezcla sobre la distribución vertical del oxígeno. Se observa la mezcla de agua profunda con concentraciones de oxígeno bajas, con agua más superficial con concentraciones elevadas. Esto genera un perfil más vertical, con relación a otras estaciones (Fig. 8). En invierno los valores de superficie máximos fueron $>300 \mu\text{M}$, mientras que en verano sólo fueron ligeramente $>200 \mu\text{M}$. La concentración promedio de oxígeno en los primeros 100 m fue de $137 \pm 47 \mu\text{M}$ en verano, mientras que en invierno fue de $188 \pm 60 \mu\text{M}$. Durante el verano las concentraciones de oxígeno en las capas más superficiales siempre fueron menores a la concentración de saturación. En contraste, durante el invierno los primeros 25 m presentaron concentraciones de $28 \pm 23 \mu\text{M-O}_2$ por arriba de la concentración de saturación (excepto E6, E7, E8). Este hecho es un reflejo del efecto combinado de la producción de oxígeno por fotosíntesis y la mayor solubilidad de gases con temperaturas bajas. A profundidades correspondientes al mínimo de oxígeno se registraron valores $<10 \mu\text{M}$. Hacia el fondo, las concentraciones alcanzaron valores de $20 < \text{O}_2 < 40 \mu\text{M}$ entre 1400 y 1500 m. Los perfiles sugieren transporte de agua profunda con concentraciones bajas de oxígeno, hacia la superficie en la región de las islas. A la par se aprecia que el efecto de la mezcla vertical es más intenso en invierno; se presentan concentración más elevadas hacia la profundidad en esta época.

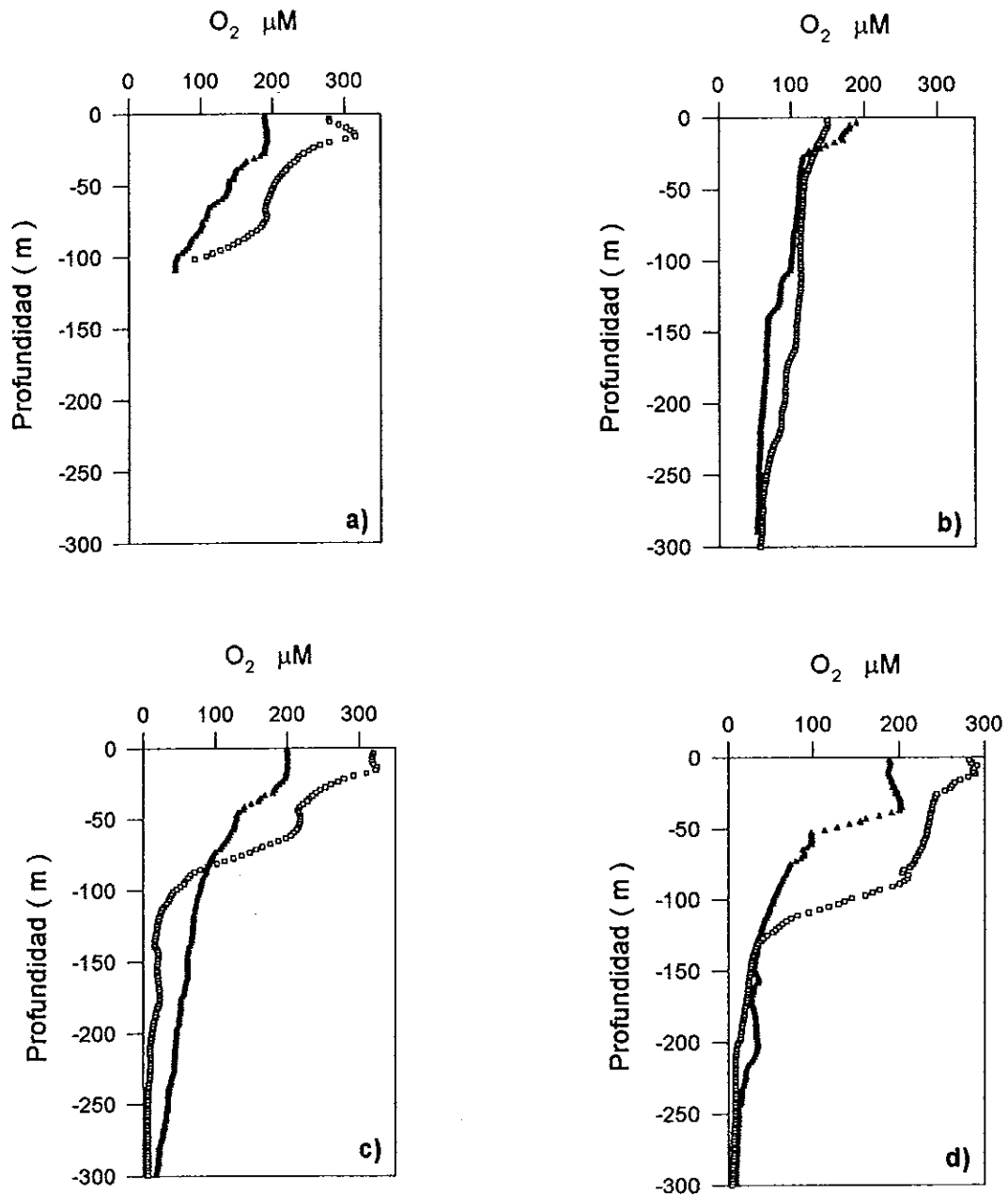


Figura 8. Distribución vertical de oxígeno en cuatro estaciones representativas del eje central del Golfo. a) E1; b) E7; c) E12; d) E19. Δ verano; \square invierno.

6.1.4. Temperatura.

En verano la temperatura superficial varió entre 26 y 30 °C, mientras que en invierno varió entre 14 y 21 °C. En ambos cruceros los valores menores se encontraron en la región de las islas. En verano, exceptuando la región de las islas, las temperaturas superficiales fueron muy similares a lo largo del eje central. En invierno las temperaturas más altas se presentaron en la parte sur del Golfo. La termoclina se situó entre los 10 y 30 m de profundidad y fue más somera en invierno (figura 9). En la E7, la termoclina prácticamente no se distingue en los primeros 300 m. Una forma de darse una idea sobre las condiciones de mezcla, es a través de las diferencias de temperatura entre la superficie y cierta profundidad (ΔT). A 100 m de profundidad, ΔT presentó valores de 7-14 °C en verano y de 1-7 en invierno. En ambos cruceros el valor menor se encontró en la E7, resaltando las condiciones de mezcla en la región de las islas. La figura 10 muestra una estructura en forma de domo en la región de las islas, que sugiere el transporte de agua fría hacia la superficie. Las isothermas muestran condiciones de estratificación en la parte centro y sur del Golfo. En invierno destacan dos estructuras más en forma de domo en la parte central del Golfo, lo cual es consistente con las isolíneas de nutrientes en esta época.

6.1.5. Salinidad.

Los valores de salinidad son similares a los reportados en la literatura. La variación superficial fue de 34.78 a 35.77 en verano, mientras que en invierno fue de 35.00 a 35.42. En la figura 11 se presenta la distribución vertical de la salinidad en los primeros 300 m. Nuevamente la E7 refleja la mezcla en la región de las islas. La figura 11(d) sugiere una intrusión de agua hacia el Golfo en verano y salida en invierno ~50 m, presumiblemente AST y AGC respectivamente. Las isohalinas también muestran la estructura en forma de domo en la región de las islas, que indica transporte de agua menos salina de la profundidad a la superficie (figura 12). Acorde a la clasificación de masas de agua propuesta por Torres-Orozco (1993), se puede delimitar el AGC por la

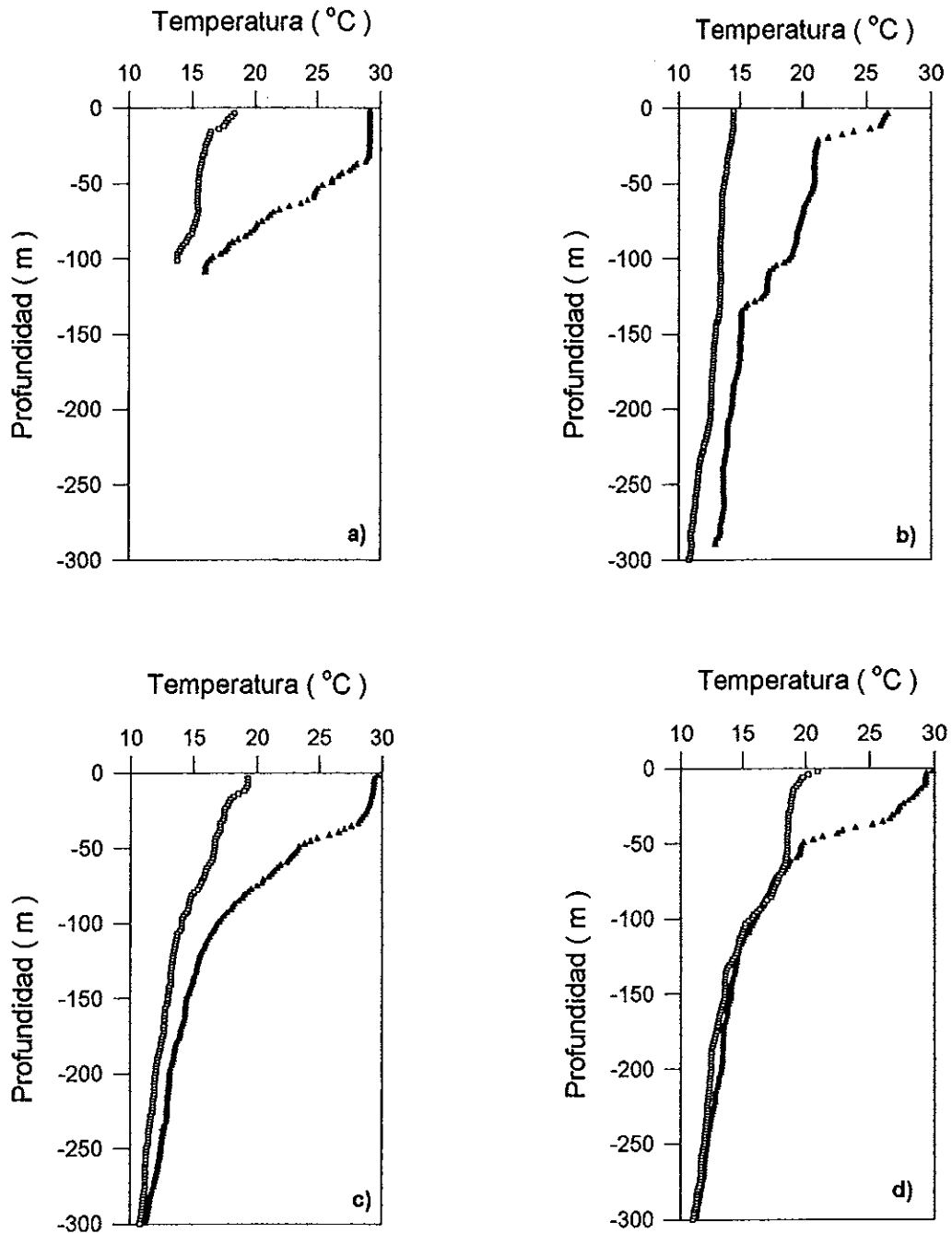


Figura 9. Distribución vertical de temperatura en cuatro estaciones representativas del eje central del Golfo. a) E1; b) E7; c) E12; d) E19. Δ verano; \square invierno.

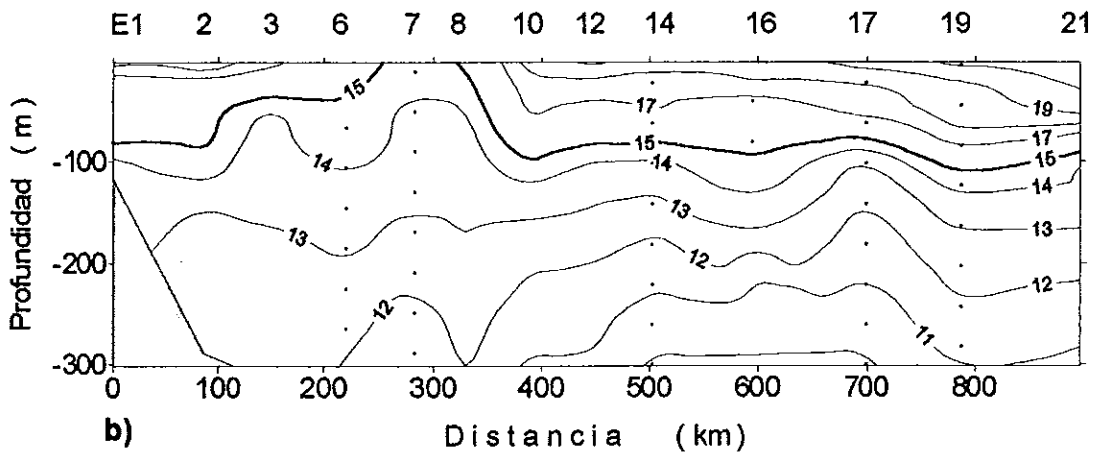
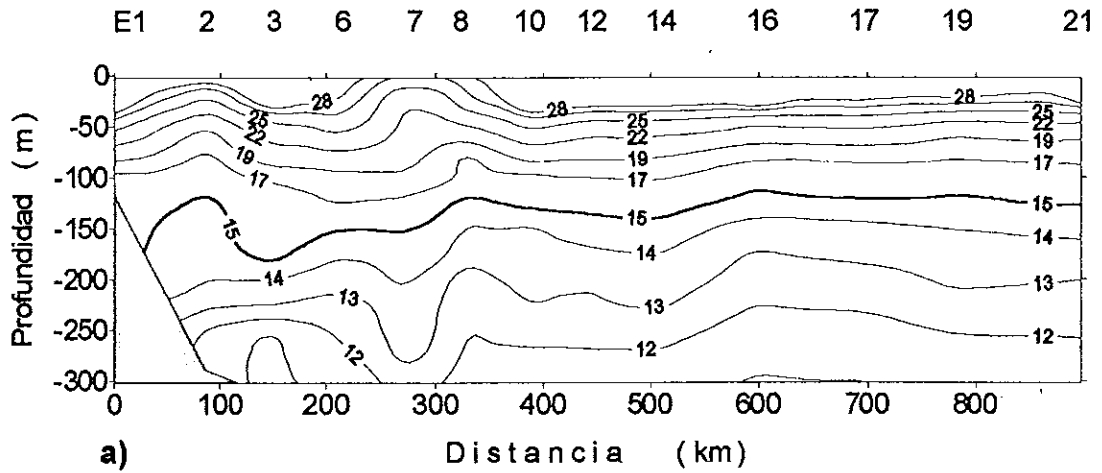


Figura 10. Isotermas a lo largo del eje central del Golfo. a) verano; b) invierno. Los números en la parte superior corresponden a los números de las estaciones de la figura 1. La distancia está referida a la estación 1.

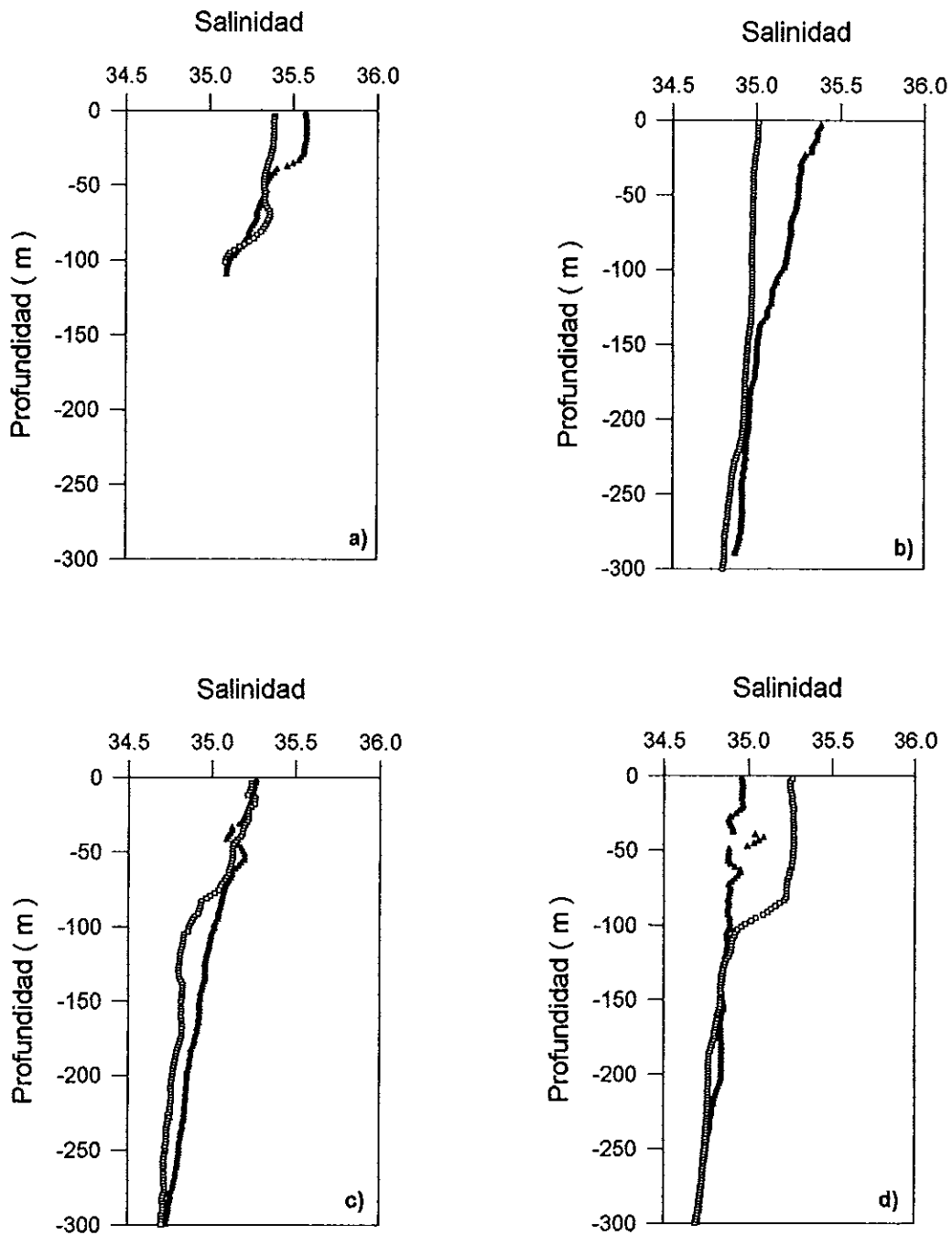


Figura 11. Distribución vertical de salinidad en cuatro estaciones representativas del eje central del Golfo. a) E1; b) E7; c) E12; d) E19. Δ verano; \square invierno.

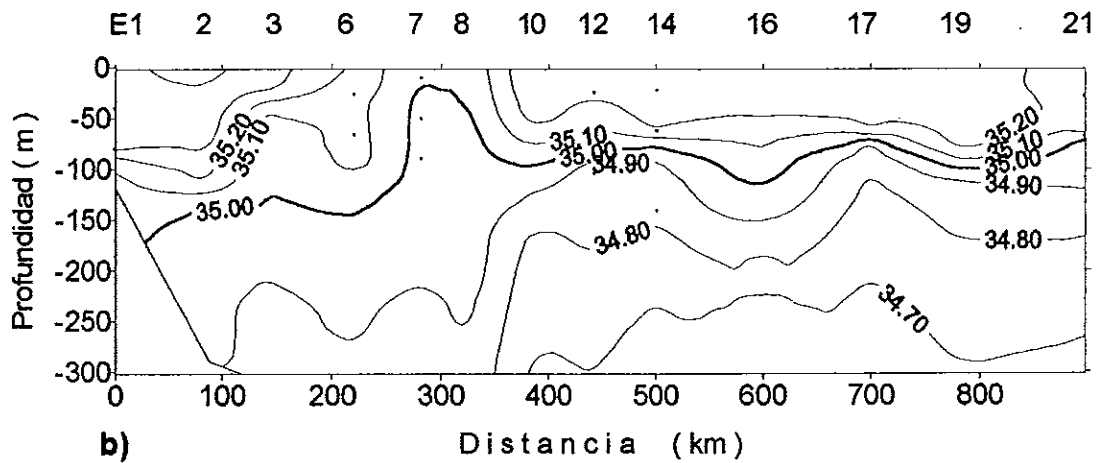
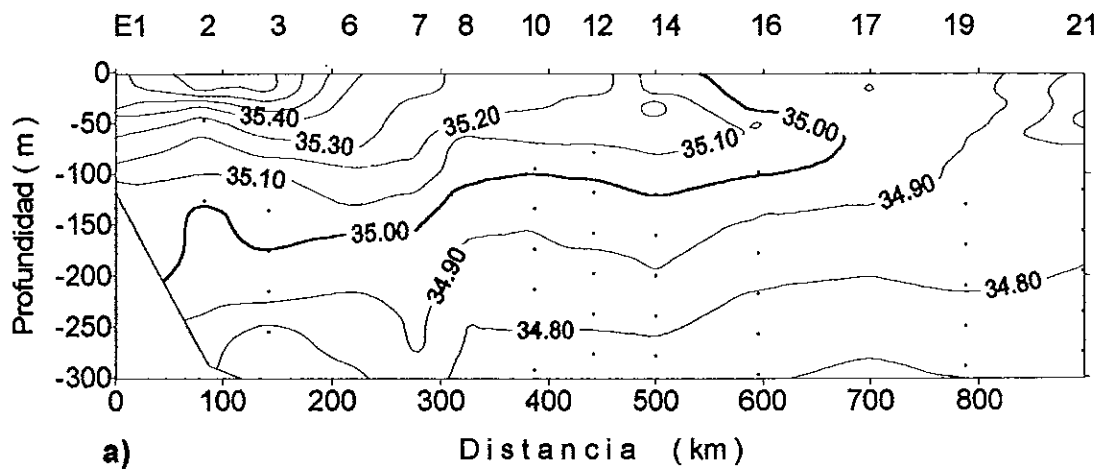


Figura 12. Isohalinas a lo largo del eje central del Golfo. a) verano; b) invierno. Los números en la parte superior corresponden a los números de las estaciones de la figura 1. La distancia está referida a la estación 1.

isohalina de 35.00. En verano se aprecia el movimiento de esta masa de agua hacia el sur. También se aprecia intrusión del AST (salinidad <35.00) entre 0 y 100 m de profundidad. La figura 12(b) muestra la presencia de AGC a todo lo largo del eje central en las capas superficiales.

6.1.6. Estratificación

En verano las condiciones de estratificación fueron muy marcadas en la totalidad del eje central del Golfo, excepto en la E7 (figura 13). En invierno la intensidad de la estratificación disminuyó de la boca del Golfo a la región de las islas. De manera general y aunque en diferente magnitud, en ambos cruceros las condiciones de estratificación fueron similares entre la parte norte y la zona centro. El valor menor del parámetro de estratificación (ϕ) se presentó en la E7 en verano ($\phi = 125 \text{ J m}^{-3}$), mientras que en invierno se presentó en la E6 ($\phi = 16 \text{ J m}^{-3}$). Los valores máximos se presentaron en la E16 ($\phi = 414 \text{ J m}^{-3}$) en verano y en la E21 en invierno ($\phi = 119 \text{ J m}^{-3}$).

6.2. Estaciones Costeras.

Los nutrientes en las estaciones costeras presentaron una distribución vertical típica. En el Canal de Ballenas solamente se tomaron muestras en verano. Aquí, las concentraciones superficiales máximas fueron de $1.9 \mu\text{M}$ para nitratos y de $0.7 \mu\text{M}$ para fosfatos. En el resto de las estaciones, las concentraciones superficiales variaron desde valores no detectables hasta valores de $8.5 \mu\text{M}$ y de 0.2 a $1.2 \mu\text{M}$ para nitratos y fosfatos respectivamente. Los valores de concentración superficial mayores se presentaron en invierno. En las figuras 14 y 15 se presentan los perfiles verticales de nitratos y fosfatos, respectivamente. En verano la nutriclina es somera en la costa de Baja California (B.C.). Se sitúa a ~ 10 m en el caso de nitratos y se observa desde la superficie en el caso de fosfatos. Posiblemente las concentraciones elevadas en las capas superficiales en la costa de B.C. sean un reflejo de un evento de surgencia. En la costa de Sonora-Sinaloa la

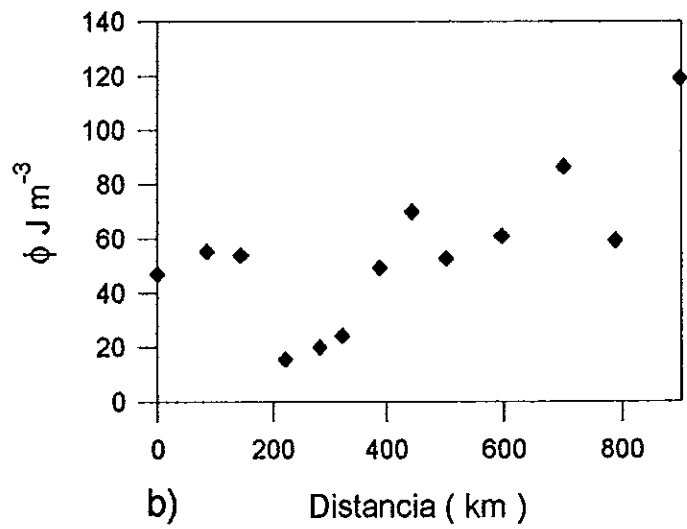
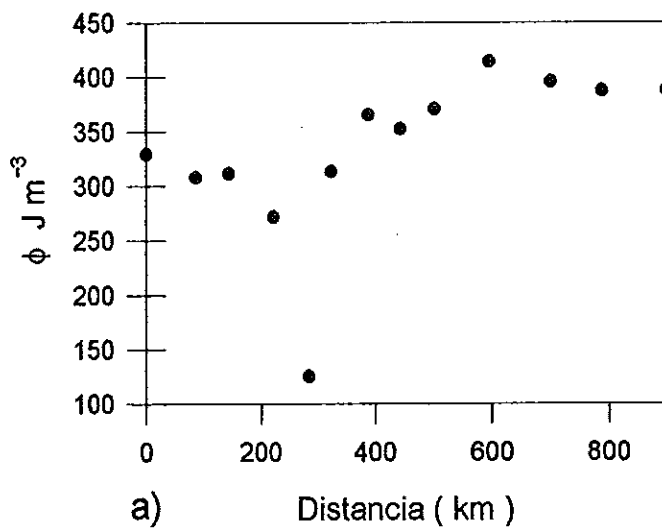


Figura 13. Parámetro de estratificación (ϕ) a lo largo del eje central del Golfo. a) verano; b) invierno. La distancia está referida a la estación 1. Nótese la diferencia de escalas en el eje correspondiente al parámetro de estratificación.

nutriclina se encontró a ~30 m, lo cual sugiere consumo por fitoplancton. En invierno la nutriclina se observa desde la superficie en ambos nutrientes. Las figuras 14(c, d) y 15(c, d) muestran enriquecimiento con nutrientes en las capas superficiales durante invierno, con relación al verano. Los perfiles de invierno no parecen indicar eventos de surgencia en la costa de Sonora-Sinaloa. En la tabla IV se presentan las concentraciones promedio de nutrientes, integradas en los primeros 100 m. Esta tabla muestra enriquecimiento con nutrientes en invierno en las estaciones costeras. En verano los valores mayores en la costa de B.C. se presentaron en la E11, mientras que en la costa de Sonora-Sinaloa se presentaron en la E13. En invierno la concentración mayor en las costas de B.C. se encontró en la E15, mientras que en la costa de Sonora-Sinaloa se encontró en la E9.

Tabla IV. Promedios de la concentración nutrientes integrada en los primeros 100 m en las estaciones costeras (mmol m⁻²).

	verano		invierno	
	<i>N-NO₃⁻</i>	<i>P-PO₄³⁻</i>	<i>N-NO₃⁻</i>	<i>P-PO₄³⁻</i>
Costa de Baja California	485 ± 260	109 ± 35	1 667 ± 288	140 ± 37
Costa de Sonora y Sinaloa	768 ± 133	95 ± 6	1 264 ± 53	176 ± 22

El oxígeno tuvo un comportamiento similar al que presentaron las estaciones en el eje central. Se registraron concentraciones superficiales que alcanzaron ~200 µM en verano y ~300 µM en invierno.

Las temperaturas superficiales variaron entre 27 y 30 °C en verano, mientras que en invierno variaron entre 15 y 21°C. En verano la termoclina se situó a ~5 m en la costa de B.C, mientras que en la costa de Sonora-Sinaloa se encontró a ~40 m (figura 16). La figura 16(b) muestra que la columna de agua presentaba condiciones de estratificación en la costa este. En invierno la termoclina se situó a <5 m en ambas costas, excepto en la E20. Esta estación presenta una diferencia de ~4 °C en los primeros 100 m en relación

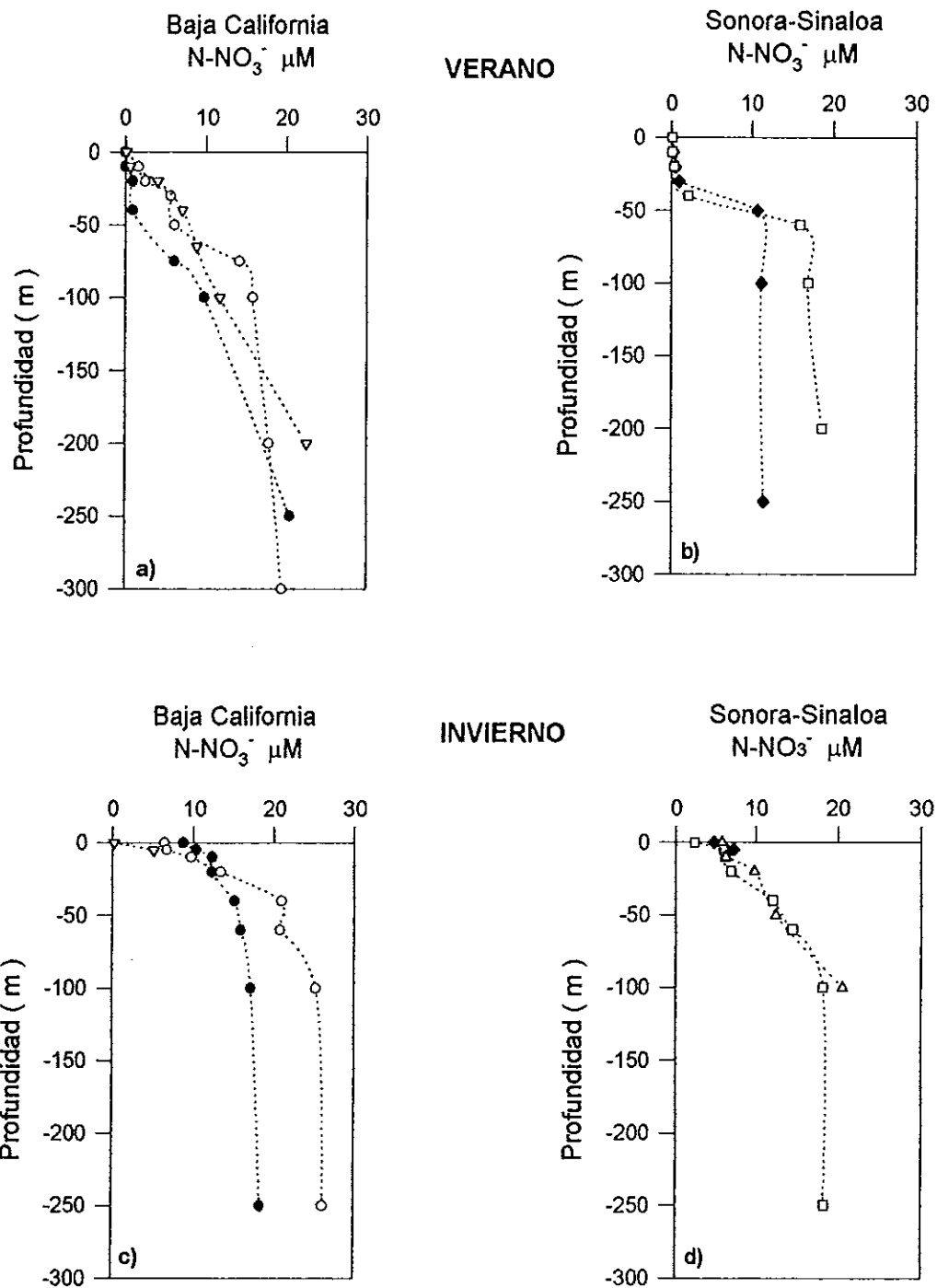


Figura 14. Distribución vertical de nitratos. a y c, Costa de Baja California; b y d, Costa de Sonora-Sinaloa. ○ E11; ● E15; ▽ E20; △ E9; □ E13; ◆ E18.

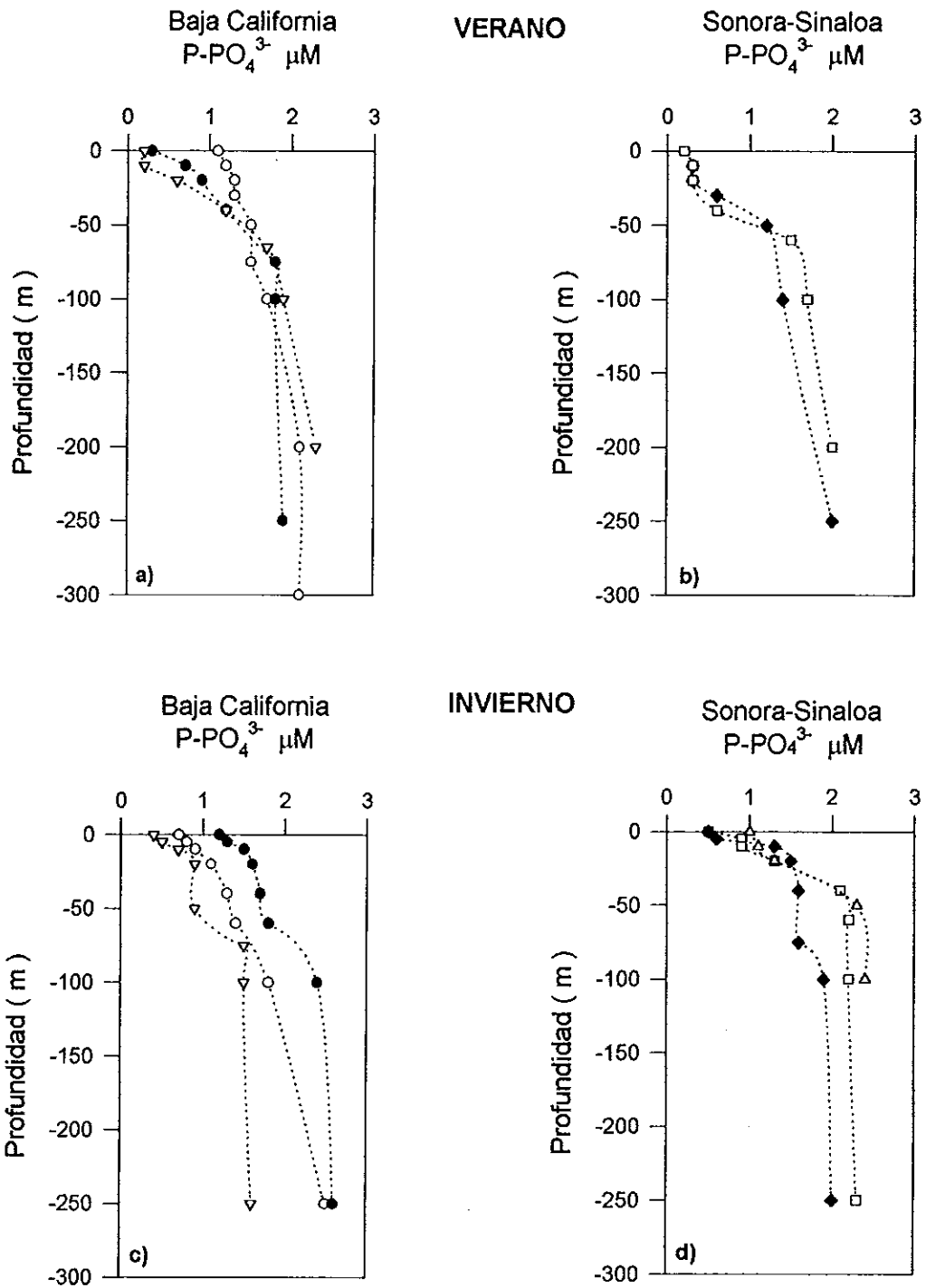


Figura 15. Distribución vertical de fosfatos. a y c, Costa de Baja California; b y d, Costa de Sonora-Sinaloa. ○ E11; ● E15; ▽ E20; △ E9; □ E13; ◆ E18.

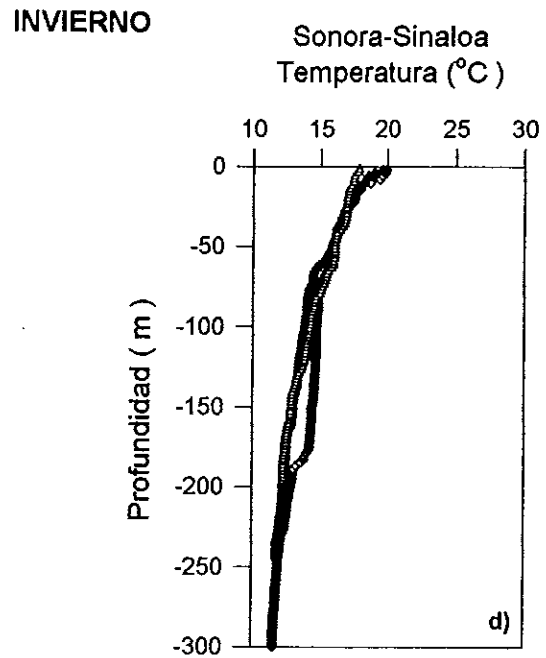
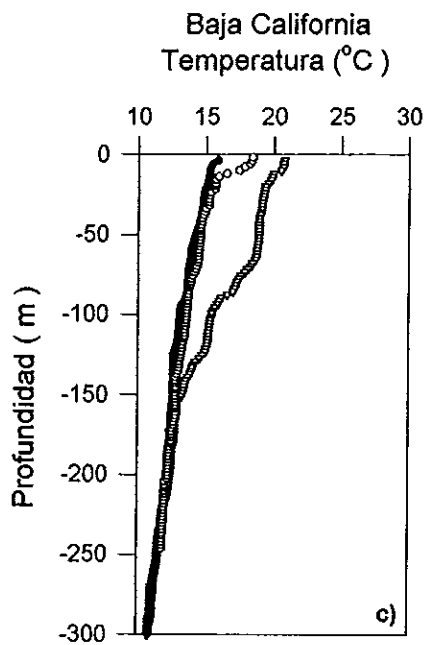
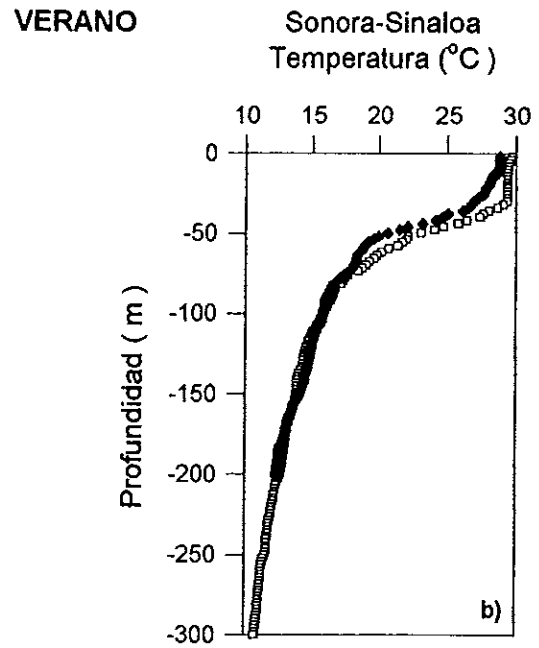
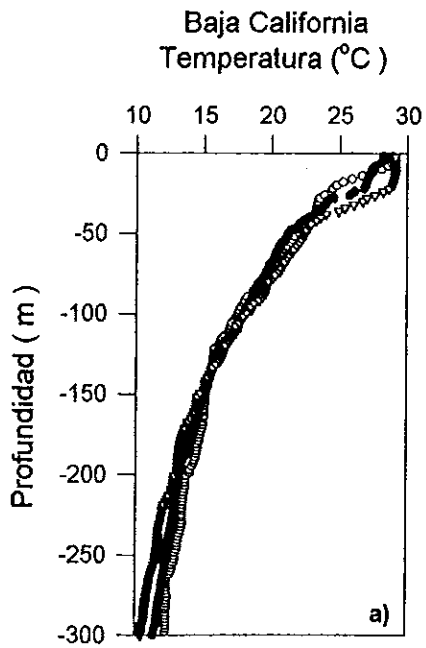


Figura 16. Distribución vertical de temperatura. a y c, Costa de Baja California; b y d, Costa de Sonora-Sinaloa. ○ E11; ● E15; ▽ E20; △ E9; □ E13; ◆ E18.

con los otros perfiles de la costa de B.C. (figura 16d). Aproximadamente a 60 m la salinidad correspondiente a la E20 es >35.20 , lo cual sugiere un evento advectivo de norte a sur. Finalmente, sin una tendencia definida con relación a las dos costas, los valores de ΔT variaron de ~ 8 a 14 °C en verano y de ~ 3 a 6 °C en invierno.

La variación superficial de la salinidad en las estaciones costeras fue de 34.50 en la E20 a 35.70 en la E4 durante el verano. En invierno todas las estaciones tuvieron salinidad >35.10 en la superficie. La distribución vertical entre ambas costas fue semejante.

Nota: debido a que los datos de salinidad y oxígeno no brindan información adicional a la descrita, se muestran como representativas únicamente las distribuciones verticales de nutrientes y temperatura (excepto las del Canal de Ballenas, que fueron similares al resto de las estaciones costeras).

7. DISCUSIÓN

7.1. Generalidades

Los datos de salinidad y temperatura son consistentes con los reportes en la literatura. En el presente trabajo no se tratan de manera particular, sino que se hacen notar los aspectos que son relevantes para el estudio del comportamiento de los nutrientes. No obstante, cabe mencionar que excepto por el ASE, cuya presencia sólo se detectó durante el crucero de verano, las masas de agua ASsSt, AGC, AIP y APP fueron detectadas durante ambos cruceros. La identificación de las masas de agua se hizo de acuerdo a los datos de la tabla I.

En la totalidad del Golfo, la variabilidad de los parámetros físicos y químicos entre los cruceros de verano e invierno fue muy marcada dentro de los primeros 300 m de la columna de agua. Este hecho ya había sido observado anteriormente en el Golfo (Alvarez-Borrego *et al.*, 1978). Tanto las concentraciones de fosfatos como las de nitratos, dentro de esta profundidad fueron mayores en el crucero de invierno (marzo) que en el de verano (septiembre), lo cual concuerda con datos reportados en la literatura (e.g. Alvarez-Borrego *et al.*, 1978; Alvarez-Borrego y Schwarztlose, 1979). La nutriclina siempre fue más somera en invierno. La distribución vertical de ambos nutrientes resalta el enriquecimiento superficial-subsuperficial en invierno, respecto al verano (e.g. figuras 2, 4, 5, 7). En las figuras 3 y 6 se observa casi en todo el golfo que las isolíneas de mayor concentración se encuentran más cerca de la superficie en el invierno. Incluso, algunas de las isolíneas observadas en verano prácticamente ya no están presentes en invierno (e.g. 1.0 y 3.5 $\mu\text{M-NO}_3^-$ y 0.3 y 0.7 $\mu\text{M-PO}_4^{3-}$).

Las concentraciones de invierno presentes en la parte norte coinciden con el intervalo reportado por Lavín *et al.* (1995) para la columna de agua sobre la Cuenca Wagner (1.5-2.0 $\mu\text{M- PO}_4^{3-}$ y 12-16 $\mu\text{M-NO}_3^-$), aunque son menores que las concentraciones que reportan para las estaciones que coinciden mejor espacialmente con el presente trabajo (e.g. estaciones 9a-D4 de Lavín *et al.*, 1995). Las concentraciones en el Canal de Ballenas fueron similares a las que se encontraron en la parte norte (a

profundidades coincidentes) y menores con relación a las del resto del Golfo. Por ejemplo, a 300 m existen diferencias hasta de 14.8 μM de nitratos y 0.7 μM de fosfatos en comparación con la región de las islas. A 1000 m, que fue la muestra más profunda tomada en este trabajo en el Canal de Ballenas, hay hasta 13.6 μM y 0.9 μM menos que en la región centro-sur de nitratos y fosfatos respectivamente, lo cual concuerda con las observaciones de Alvarez-Borrego *et al.* (1978). Desafortunadamente no se cuenta con información para esta zona en condiciones de invierno, para poder hacer una comparación de la variación estacional en el canal.

Existe una diferencia en el contenido de nutrientes entre verano e invierno. En general se observan valores mayores de nutrientes por unidad de área en invierno. Este hecho es evidente en la mayoría de las estaciones (Figs. 4 y 7). Por ejemplo en la parte norte, en la E1 hay 595 mmoles m^{-2} más de NO_3^- y 85 mmoles m^{-2} más de PO_4^{3-} en invierno. La E14 en la parte central del Golfo, contiene 227 mmoles m^{-2} más de NO_3^- y 119 mmoles m^{-2} más de PO_4^{3-} en invierno. La concentración de nutrientes por unidad de área en invierno sugiere un enriquecimiento de ~35% en nitratos y ~45% de fosfatos con relación al verano.

La región de las islas siempre tuvo la mayor concentración de ambos nutrientes en ambos cruceros. Esta característica se ha atribuido a la mezcla por mareas (Alvarez-Borrego *et al.*, 1978; Alvarez-Borrego, 1983; Alvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991; Gaxiola-Castro *et al.*, 1995). El parámetro de estratificación (ϕ) y los perfiles verticales de oxígeno, temperatura y salinidad muestran que la mezcla vertical es un proceso importante en la región de las islas (Figs. 8, 9, 11 y 13). Durante el crucero de verano la E8 presentó la concentración de nutrientes por unidad de área más alta en la región de las islas, mientras que la E7 la presentó en el invierno. Aparentemente se presenta una forma de movimiento que ocasionó que la zona enriquecida se desplazara hacia el norte. Es decir, en el primer crucero (verano) los valores integrados mayores se encontraron en las estaciones 7 y 8, mientras que en el segundo (invierno) los valores mayores se encontraron en las estaciones 6 y 7 (Figs. 4 y 7). Este efecto no puede ser explicado por

la acción de los vientos, ya que durante el verano soplan del sureste al noroeste y en invierno del noroeste-sureste (e.g. Alvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991).

Las estaciones costeras también mostraron el enriquecimiento con nutrientes en las capas superficiales en invierno, respecto al verano. En el Golfo de California (GC) se presentan eventos de surgencia en las costas de Sonora-Sinaloa en invierno y en verano se presentan en las costas de Baja California (e.g. Alvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991). Durante el verano la nutriclina fue más somera en la costa de B.C. y la termoclina fue menos pronunciada (Figs. 14, 15 y 16; a y b). Posiblemente este hecho es producto de un evento de surgencia, los cuales son débiles en esta época debido a las condiciones de estratificación (Santamaría-del-Angel *et al.*, 1999). En invierno no se aprecia el efecto de una posible surgencia. Por un lado, la nutriclina se presenta desde la superficie y las concentraciones de nutrientes son similares en ambas costas (Figs. 14 y 15; c y d) y por otro, los perfiles de temperatura también son similares en ambas costas (Fig. 16, c y d). Sin embargo, una característica que resalta en la figura 16c es el perfil correspondiente a la E20. Aproximadamente a 60 m la salinidad de este perfil es >35.00 . Este fenómeno ya ha sido observado en diversos trabajos (e.g. Castro y colaboradores, sometido; y otros citados por ellos) y se debe a un evento advectivo de AGC de norte a sur por la costa de B.C.

7.2. Mezcla vertical y advección

En la figura 17 se presenta la concentración de nutrientes por unidad de área contra el parámetro de estratificación (ϕ). En esta figura sobresalen dos puntos importantes, 1) existe una relación inversa entre la concentración integrada de nutrientes y el parámetro de estratificación, y 2) las estaciones que se encuentran en la región de las islas presentan los valores más elevados de nutrientes. Así, se plantea el siguiente escenario como una explicación del enriquecimiento con nutrientes en las capas superficiales del Golfo en invierno. Durante el verano la estratificación es intensa y permite que las condiciones de luz sean óptimas para el desarrollo del fitoplancton (Stigerbrandt y Leif Djurfelft, 1996). Por esta razón los máximos de clorofila son en general más profundos en esta época (e.g.

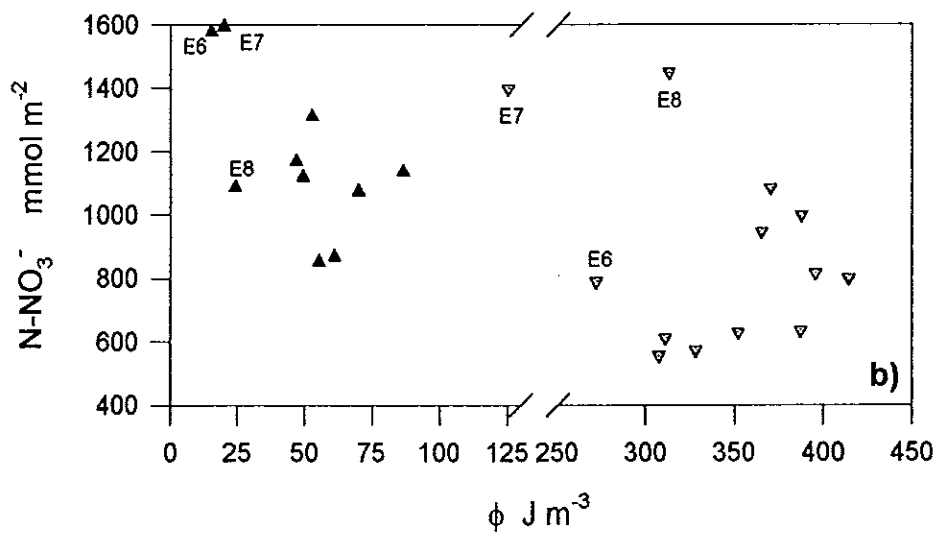
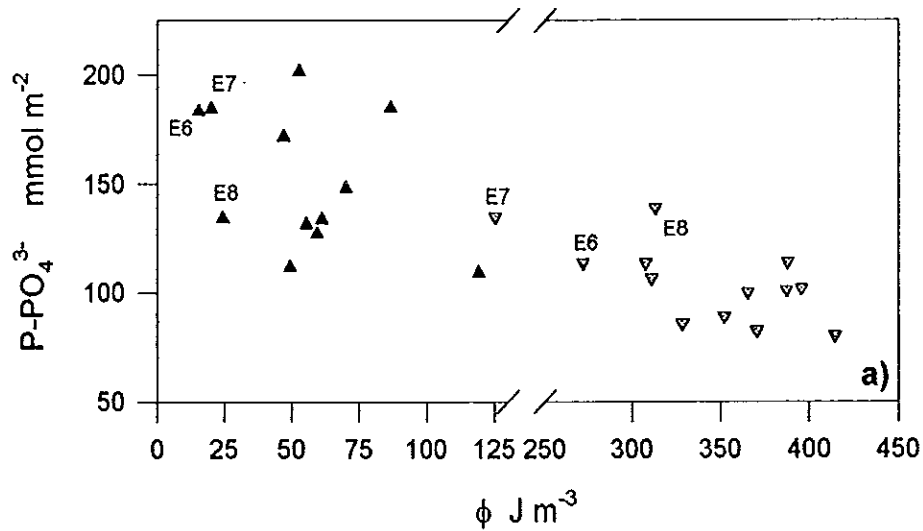


Figura 17. Concentración de nutrientes integrada en los primeros 100 m v, parámetro de estratificación (ϕ). ∇ verano; \blacktriangle invierno.

Radenac y Rodier, 1996; Macias-Carranza, 1999). Esta situación provoca que los nutrientes sean abatidos rápidamente en la capa superficial mientras tiene lugar el florecimiento fitoplanctónico (Owens, 1993; Millero, 1996; Lavín *et al.*, 1997). En contra. En contraste, durante el invierno la influencia oligotrófica del ASE es mínima (Torres-Orozco, 1993; Lavín *et al.*, 1997), la temperatura del agua disminuye, prevalecen vientos intensos del noroeste ($8-12 \text{ m s}^{-1}$; Lavín *et al.*, 1997) y además, continúa el aporte de nutrientes en la región de las islas. Consecuentemente la estratificación se rompe, aumenta el grosor de la capa de mezcla (Figs. 9 y 10) y las capas superficiales se enriquecen con nutrientes (Figs. 2, 3, 5, 6). De esta manera las condiciones óptimas de luz y nutrientes para el desarrollo fitoplanctónico se encuentran a profundidades más someras (e.g. Ryan *et al.*, 1999). Esta observación concuerda con los resultados de Santamaría-del-Angel *et al.* (1994), quienes encontraron una diferencia marcada en la concentración superficial de pigmentos, con concentraciones $>10 \text{ mg m}^{-3}$ en invierno y $<0.1 \text{ mg m}^{-3}$ en verano. Finalmente, al tiempo que se rompe la estratificación un gran número de partículas se hunde (e.g. Pike y Kemp, 1999) y son remineralizadas hacia el fondo, enriqueciendo con nutrientes el agua a profundidades intermedias.

Para entender los procesos que controlan la distribución espacial y la variabilidad temporal de los nutrientes en el Golfo, se puede pensar en el comportamiento conservativo de los nutrientes de la forma en que se estudian en sistemas estuarinos con descargas elevadas de estos materiales. En estos sistemas se espera que la concentración de nutrientes disminuya conforme se llega a la boca del estuario, en forma inversa al comportamiento que presenta la salinidad. Así, utilizando un diagrama de mezcla se pueden notar desviaciones de un comportamiento conservativo, que seguramente se deben a un proceso diferente al de mezcla (e.g. consumo por fitoplancton, remineralización) (e.g. Fisher *et al.*, 1988; Windom *et al.*, 1991). En los diagramas de mezcla que se presentan en la figura 18 se consideran al AIP y al AGC como los miembros terminales. Esta figura muestra que existe una fuerte relación inversa entre los nutrientes y la salinidad ($r^2 > 0.60$). En general, los datos correspondientes a la región de las Islas y zonas adyacentes (a profundidades intermedias) siguen la línea de mezcla en los diagramas. Este hecho sugiere que la mezcla vertical es el proceso que

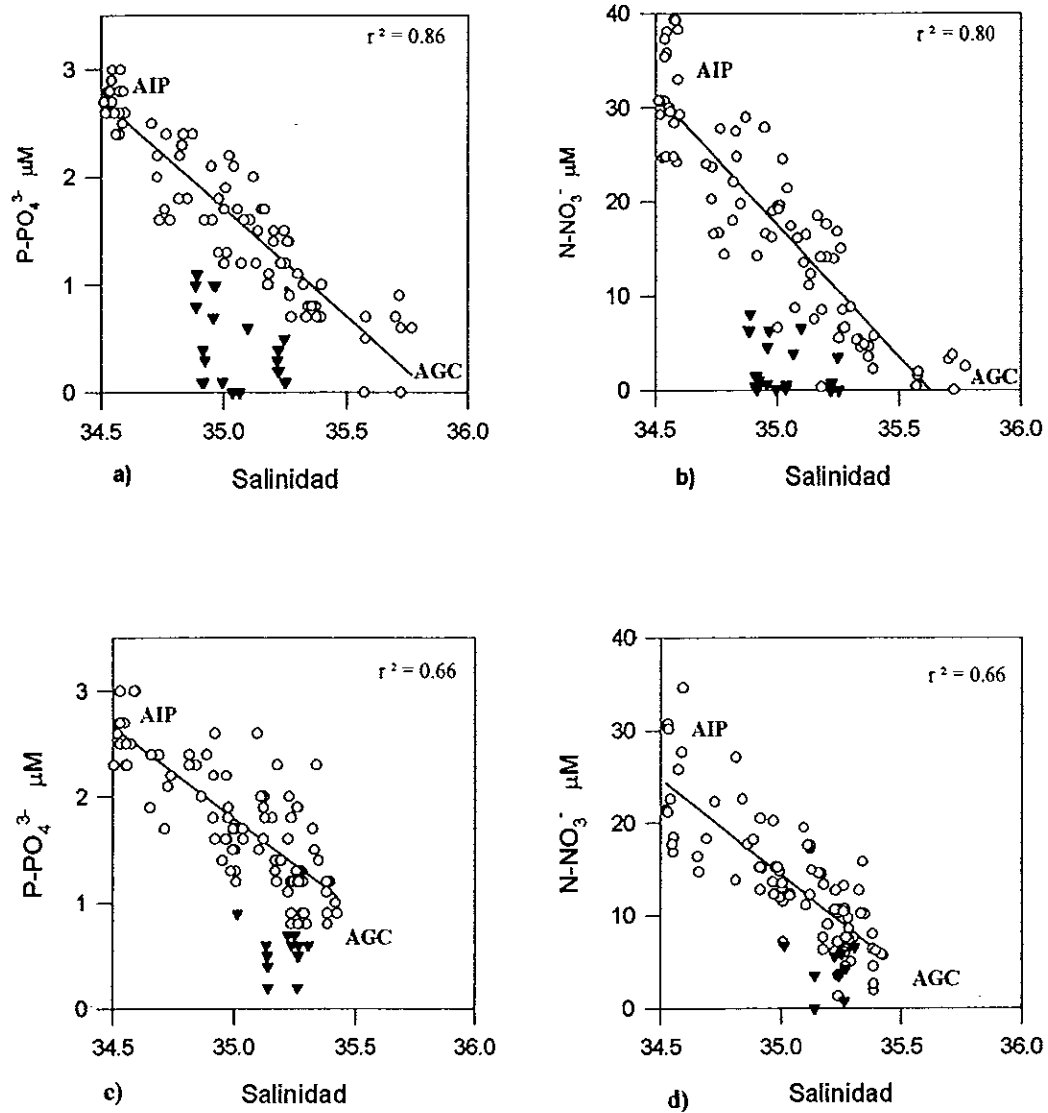


Figura 18. Diagramas de Mezcla. a) y b) verano; c) y d) invierno. ○ Datos de nutrientes correspondientes al eje central del Golfo. ▼ Datos superficiales de la parte centro-sur (0-50 m), ver texto para explicación.

principalmente controla el comportamiento de los nutrientes en la región de las islas. En verano las concentraciones superficiales de nutrientes (0-50 m) de las E10-E19 caen por debajo de la línea de mezcla. Se aprecia una disminución gradual de la concentración de nutrientes en dirección del gradiente horizontal de salinidad (▼, figura 18 a y b). Por otro lado, las figuras 3, 4, 6 y 7 (verano) también muestran una disminución gradual en el contenido de nutrientes en la superficie, desde la región de las islas hacia la parte central. Estas figuras y los diagramas de mezcla, sugieren que el consumo de nutrientes por fotosíntesis en las capas superficiales domina en la parte central del Golfo durante el verano. En esta época se reportan valores de productividad primaria (PP) de $\sim 2.9 \pm 1.2$ gC m⁻² d⁻¹ (240 ± 98 mmol C m⁻² d⁻¹; datos tomados de Gaxiola-Castro y Alvarez-Borrego, 1986 y de Millán-Núñez *et al.*, 1993). A pesar de que la productividad primaria es alta en invierno, $\sim 3.5 \pm 2.4$ gC m⁻² d⁻¹ (289 ± 202 mmol C m⁻² d⁻¹; datos tomados de Gaxiola-Castro y Alvarez-Borrego; de Lara-Lara y Valdez-Holguín, 1988 y de Gaxiola-Castro *et al.*, 1995), el consumo de nutrientes es menos evidente en los diagramas de mezcla, sobre todo en el caso de los nitratos (▼, figura 18 c y d). La disminución superficial y gradual de nutrientes de norte a sur es más "ligera" que en verano (Figuras 3, 4, 6 y 7, invierno). De esta manera, estas figuras, los diagramas de mezcla y los datos de PP en invierno, sugieren que el efecto de consumo por fotosíntesis en las capas superficiales de la parte centro-sur es oscurecido por el enriquecimiento con nutrientes en esta época. Así, las figuras muestran que la mezcla vertical es el principal control de los nutrientes en la región de las grandes islas y sugieren que la fotosíntesis es un proceso importante en el comportamiento de estos materiales en las capas superficiales de la región centro-sur del Golfo.

La "lengüeta" salina definida por la isohalina de 35.00 (AGC) observada en la figura 12, representa un proceso advectivo que sugiere la importancia de la circulación termohalina en el transporte de materiales hacia el sur. El efecto de la advección es notable hasta la parte central del Golfo en verano y hasta la boca en invierno. De esta manera, los nutrientes que emergen en la región de las islas son transportados hacia la parte central, donde son aprovechados por el fitoplancton en las capas superficiales. Por otro lado, los nutrientes que son producto de la remineralización mantienen el agua

enriquecida a profundidades intermedias. Este hecho sugiere que la circulación termohalina también cumple un papel importante en el suministro de nutrientes de aguas de profundidades intermedias hacia la región de las islas. Delgadillo-Hinojosa y colaboradores (sometido) sugieren un escenario similar al que aquí se ha planteado, para explicar la distribución y enriquecimiento con cadmio en el GC. Ellos mencionan que los perfiles de cadmio en la región de las islas son controlados principalmente por la mezcla vertical y que los procesos biológicos ejercen sólo una influencia mínima en la zona. Concluyen que cuando el AGC es transportada por advección hacia el sur, el cadmio disuelto es incorporado al material particulado, sugiriendo el dominio de los procesos biológicos en la parte central del Golfo. Una vez que el material biogénico se hunde, éste es remineralizado a profundidades intermedias. Mencionan que aproximadamente el 98-99.5% del carbono fijado en la superficie es remineralizado en la columna de agua y que así, este proceso mantiene niveles altos de cadmio en las aguas del golfo. Finalmente, las figuras y el escenario que se plantea en el presente estudio sugieren que el comportamiento de los nutrientes y el enriquecimiento durante invierno en las capas superficiales del Golfo, es producto de la interacción de diferentes procesos: 1) aporte continuo de nutrientes a la superficie por mezcla vertical, 2) transporte de nutrientes por la circulación termohalina, 3) intensificación de la mezcla por la acción del viento del noroeste en invierno (rompimiento de la estratificación), 4) alta remineralización de materia orgánica a profundidades intermedias en invierno y 5) menor influencia oligotrófica del ASE.

7.3. Razón N/P

La razón N:P es un parámetro importante en la descripción de procesos químicos en el mar (Fanning, 1992). La importancia de su estudio se debe a que la distribución de los nutrientes nitrato y fosfato controla en gran medida la producción primaria en los océanos (Tyrrell y Law, 1997; Tyrrell y Law, 1998). En la figura 19 se presenta la relación N:P del Golfo de California. Esta figura sugiere que el NO_3^- puede ser el nutriente limitante para la producción primaria en este mar marginal. Las razones N:P en el presente estudio fueron de 12.7 ± 3.4 en el verano y de 9.3 ± 3.1 en el invierno. Estos

valores promedio de la razón N:P son menores que la relación $N_{16}:P$ propuesta por Redfield *et al.* (1963) y también son menores que el valor de 16.2 ± 0.7 reportado por Alvarez-Borrego *et al.* (1978) para el GC. Sin embargo, recientemente se ha reconocido que la relación de Redfield no es universalmente aplicable (e.g. Codispoti, 1995; Fonselius, 1996; Rubin *et al.*, 1998; Rees *et al.*, 1999). Las razones N:P bajas son características de mares marginales y de mares con comunicación restringida (Tyrrell y Law, 1998). Del mismo modo, los valores observados aquí concuerdan con las razones N:P correspondientes a las provincias del Pacífico Noreste propuestas por Fanning (1992), las cuales son $<14 \text{ mol mol}^{-1}$. Este autor encontró en su trabajo que una gran extensión del Pacífico Noreste presenta razones tan bajas como 0-3 en la superficie y 13.5-14.5 en el fondo ($>2000 \text{ m}$) (ver mapa 2 de Fanning, 1992).

En el Golfo de California se presentan condiciones que podrían producir los valores bajos en las razones N:P encontrados en este trabajo. Una de ellas es la predominancia del grupo de las diatomeas en el fitoplancton del Golfo. Recientemente en el Mar de Ross (Océano Sur), Arrigo *et al.* (1999) observaron que en zonas dominadas por diatomeas las razones N:P son bajas, aparentemente debido a los requerimientos de nutrientes propios de este grupo de fitoplancton. Estos autores reportan razones de 9.6 ± 0.3 ($r^2 = 0.99$), que es un valor intermedio respecto a las razones de 9.3 y 12.7 observadas en el presente estudio. En el GC diversos trabajos manifiestan el predominio y la importancia de las diatomeas. Alvarez-Borrego (1983) menciona que las diatomeas son la mayor fuente de ópalo a los sedimentos en el Golfo. Thunell *et al.* (1994) discuten que el GC juega un papel importante en el ciclo global del sílice biogénico. Ellos estimaron un flujo de sílice hacia el fondo de $\sim 0.35 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, del cual $\sim 15\text{-}20\%$ llega a los sedimentos. Este hundimiento de sílice es comparable con el del Océano Sur (Pike y Kemp, 1999). Las diatomeas son un grupo que domina principalmente en zonas turbulentas (e.g. Lara-Lara *et al.*, 1993). En la región de las islas son abundantes (e.g. Zeitzschel, 1970: citado por Alvarez-Borrego y Gaxiola-Castro 1988; Cortés-Lara *et al.*, 1999), se han observado concentraciones de hasta 610×10^3 diatomeas L^{-1} (Millán-Núñez, 1992) y junto con los dinoflagelados (en menor abundancia) pueden

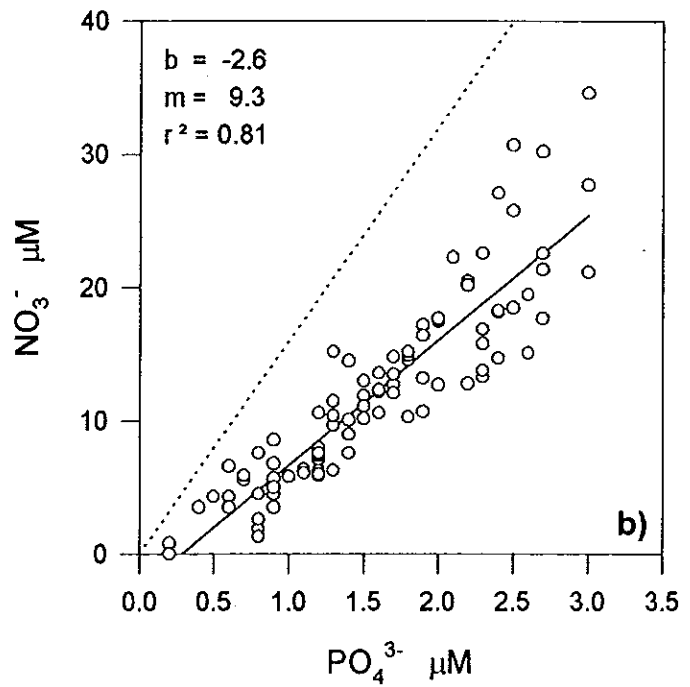
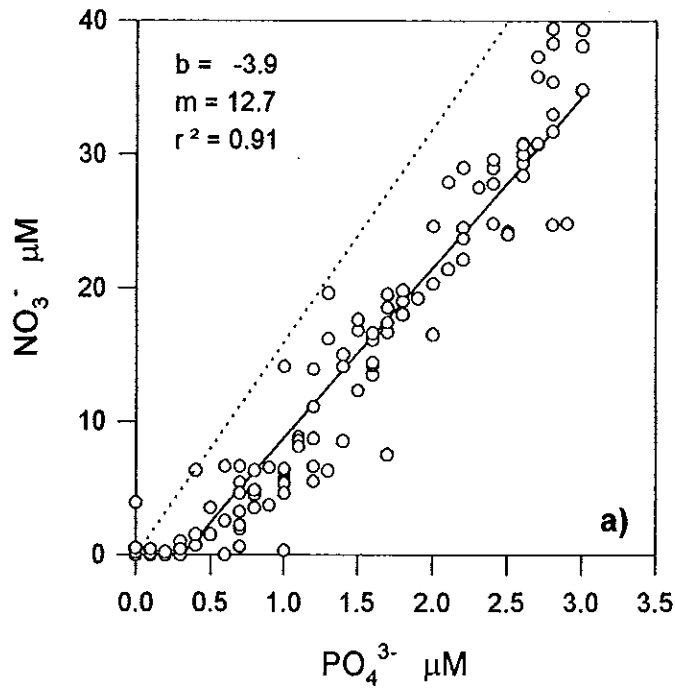


Figura 19. Razones N:P. a) verano; b) invierno. Razón $\text{N}_{16}:\text{P}$ (Redfield *et al*, 1963), línea de puntos.

constituir el 70-100 % de la población fitoplanctónica en la zona (Gaxiola-Castro *et al.*, 1995). En un estudio de pigmentos fitoplanctónicos paralelo al presente trabajo (con muestras en las mismas estaciones y de las mismas botellas), Macías-Carranza (1999) encontró que la fucoxantina –un pigmento característico de las diatomeas– fue el pigmento accesorio más abundante en invierno y verano. Este pigmento presentó concentraciones de 0.2-1.9 mg m⁻³. La concentración de pigmentos accesorios que representan a otros grupos fitoplanctónicos fueron ≤ 0.5 mg m⁻³. De esta manera, los datos del presente estudio y la información en la literatura sugieren que las aguas del Golfo pueden presentar una razón N:P < 16 debido a la presencia de diatomeas.

Otra causa posible de la razón N:P baja en el Golfo se relaciona con el proceso de denitrificación. Fanning (1992) menciona que la denitrificación puede ser responsable de las proporciones N:P con valores bajos (<14 mol mol⁻¹) que encontró en el Pacífico Noreste. En el presente trabajo, por abajo de los primeros 300 m de la columna de agua las concentraciones de nitratos generalmente fueron menores en invierno. También, aunque las concentraciones de nitratos en ambos cruceros son similares a datos que presenta Alvarado-Aguilar (1998) en la boca del Golfo, en general son menores que los reportados por Álvarez-Borrego *et al.* (1978). En la figura 20 se muestran datos de fosfatos del presente estudio comparados con datos de fosfatos de Hayward (1987) y también, datos de nitratos del presente trabajo comparados con datos de nitratos de Hayward (1987) y de Bruland *et al.*, (1994). Ambas comparaciones pertenecen al Pacífico Central del Norte (28° N, 155° W). Hayward (1987) reporta valores hasta 300 m solamente. Sin embargo, es visible el enriquecimiento con fosfatos en el GC, al menos en los primeros 300 m. En las capas superficiales del Golfo las concentraciones de nitratos son mayores (hasta con ~20 μ M) que los valores que reportan estos autores. Por el contrario, hacia la profundidad las concentraciones observadas en el presente estudio son menores (~10 μ M) que los datos de Bruland (1994). No obstante, considerando los niveles de oxígeno característicos del GC en aguas intermedias (O₂: < 22 μ M; z: 100-1000 m), los valores de nitratos concuerdan con las concentraciones observadas en mares con niveles de oxígeno

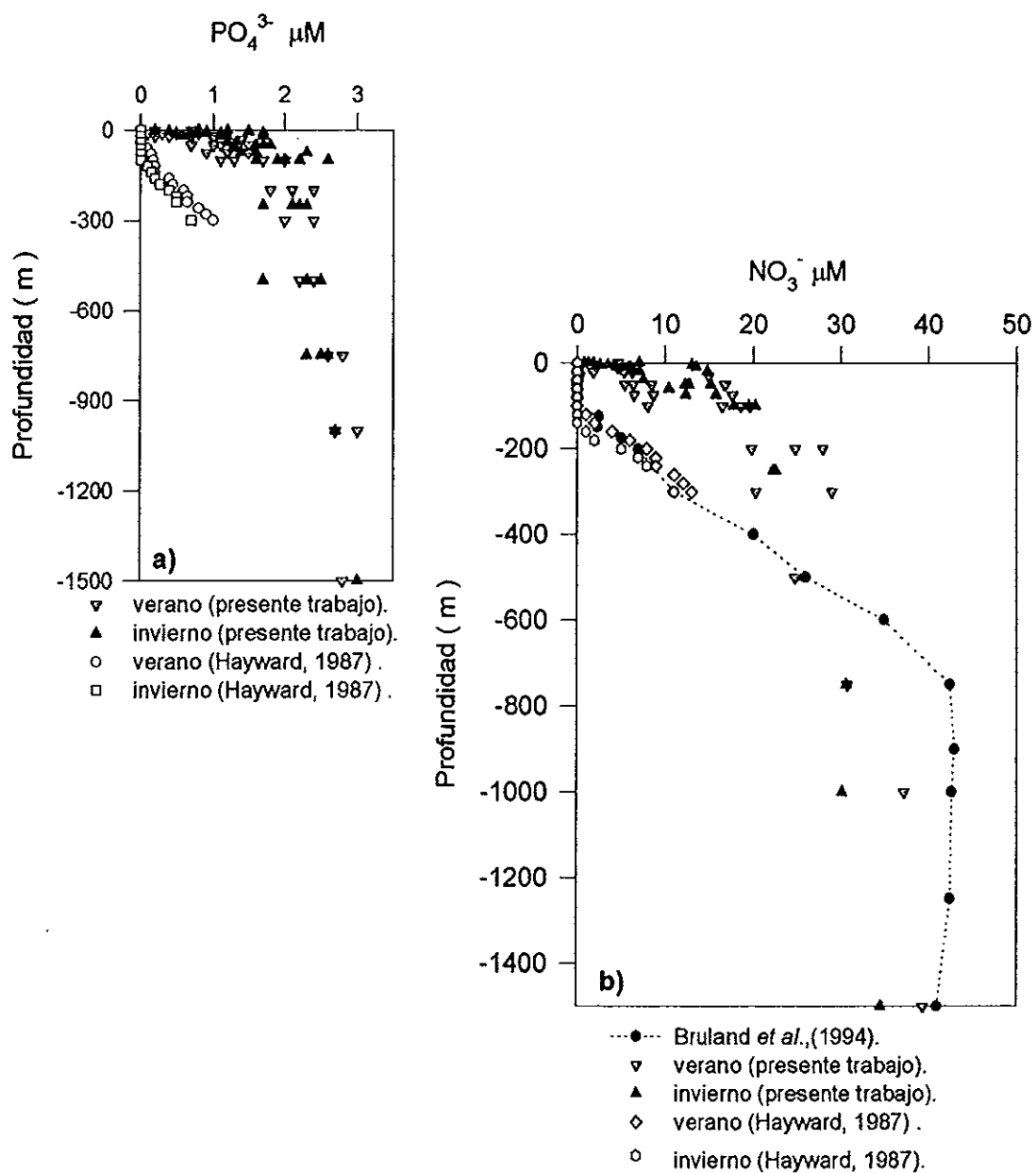


Figura 20. Distribución vertical de fosfatos comparados con datos de Hayward (1987) y distribución vertical de nitratos comparados con datos de Hayward (1987) y con datos de Bruland *et al.*, (1994). Los datos referidos al presente estudio corresponden a las E1, E7, E12 y E19 de ambos cruceros.

similares. Por ejemplo, en la zona denitrificante del Mar de Arabia, Mantoura *et al.* (1993) reporta valores de ~ 5 a $25 \mu\text{M-NO}_3^-$ de 100 a 500 m ($\text{O}_2 < 10 \mu\text{M}$; z: 110-100 m). Sus datos corresponden a perfiles que van desde $8\text{-}13 \text{ nM-NO}_3^-$ en la superficie, hasta $\sim 35 \mu\text{M}$ a 1400 m. Esta información y los datos de nitratos observados a profundidades intermedias en el Golfo, sugieren que la razón N:P también puede ser menor que 16 debido al efecto de la denitrificación.

Con el fin de evaluar el efecto de la denitrificación en las concentraciones de nitratos, se realizó una estimación de la deficiencia de este nutriente (ΔNO_3^-). En la figura 21 se presentan los perfiles de la UAO, O_2 y un ejemplo de la estimación del ΔNO_3^- , utilizando datos de la E12. La UAO y el O_2 se muestran como referencia debido a que en las capas superficiales su valor y concentración respectivamente, pueden ser afectados por la fotosíntesis y la solubilidad de gases. Por esta razón, en este caso se consideraron sólo las deficiencias que se encuentran por abajo del punto donde cruzan los perfiles de estos dos parámetros. El cálculo del déficit de nitrógeno es sencillo. Se basa en la relación $\text{C}_{106}\text{N}_{16}\text{P}:\text{O}_{138}$ propuesta por Redfield *et al.* (1963). De esta manera, usando al fosfato como predictor, se hace una aproximación del NO_3^- que debería estar presente de acuerdo a la relación $\text{N}_{16}:\text{P}$. Así, la deficiencia de nitratos esta dada por:

$$\Delta\text{NO}_3^- = \text{NO}_3^-_{\text{ESP}} - \text{NO}_3^-_{\text{OBS}} \quad (\text{a})$$

donde los subíndices ESP y OBS denotan las cantidades de nitratos esperadas y observadas, respectivamente. En esta ecuación están implícitas las fracciones oxidativas y preformadas.

El ΔNO_3^- se calculó utilizando los datos de 100 a 1000 m, considerando las E8-E21 en verano y las E8-17 en invierno. Se obtuvo un valor promedio de $10.9 \pm 3.7 \mu\text{M}$ para el verano y uno de $17.2 \pm 5.7 \mu\text{M}$ para el invierno. Estos valores son similares a los

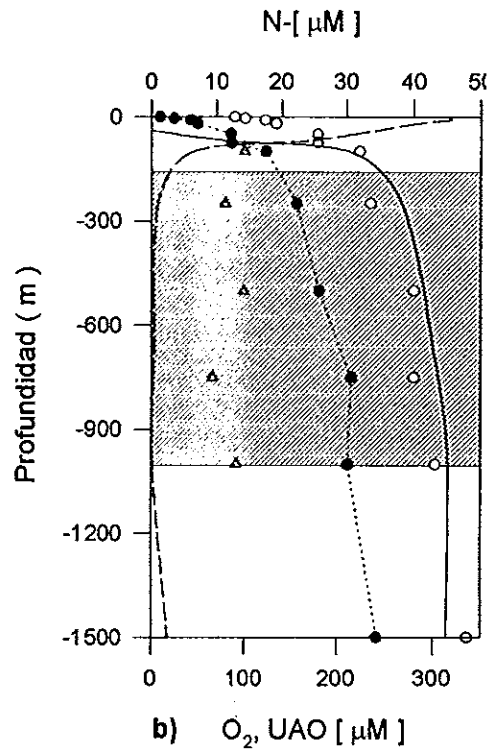
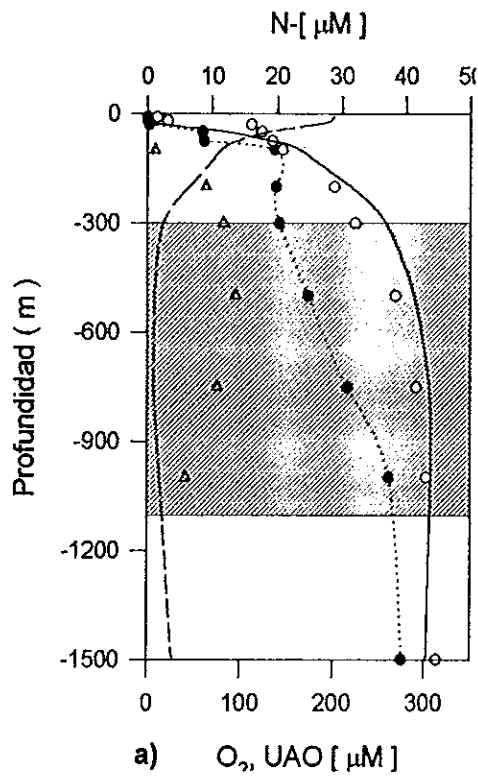


Figura 21. Ejemplo de la distribución vertical del déficit de nitratos (ΔNO_3^-). Los datos corresponden a la E12. a) verano; b) invierno. ● NO_3^- Observado; ○ NO_3^- Esperado; Δ ΔNO_3^- ; - UAO; --- O_2 . El área sombreada representa $[O_2] \leq 20 \mu M$.

déficits de $13.6 \mu\text{M}$ reportados por Cline y Richards (1972) en un transecto perpendicular a la costa en el Golfo de Tehuantepec, México ($200 < z < 800 \text{ m}$). Estos autores también utilizaron al fosfato como predictor, basándose en la relación de Redfield para estimar las deficiencias de nitratos. De la misma forma, en otros mares con niveles de oxígeno similares a los del GC también se han observado deficiencias en el contenido de nitratos. En el Mar de Arabia por ejemplo, usando la propiedad "NO" propuesta por Broecker (1974), Naqvi y Sen Gupta (1985) y Mantoura *et al.* (1993) encontraron ΔNO_3^- de ~ 10 y $\sim 8.1 \mu\text{M}$ respectivamente. A pesar de haber sido obtenidos con un método diferente, los valores de estos autores también se asemejan a los déficits encontrados en el presente estudio. Ortiz-Cárdenas (1998) encontró déficits de $15.3\text{-}17.7 \mu\text{M}$ en el Pacífico Sureste frente a Coquimbo, Chile (30° S), valores de igual forma similares a los encontrados en el Golfo. Recientemente Altabet *et al.* (1999), mediante análisis de $\delta^{15}\text{N}$ en NO_3^- y nitrógeno particulado (NP), encontraron que el proceso de denitrificación afecta la parte central del GC a profundidades intermedias. Sus datos muestran enriquecimiento de $\delta^{15}\text{N}$ (máximo de 14‰ ; $z = 500 \text{ m}$) en estas profundidades. Ellos concluyen que la denitrificación es la causa principal que modifica el $\delta^{15}\text{NO}_3^-$ subsuperficial y que es el proceso responsable de los valores $>8\text{‰}$ que ellos observaron, comparados con el promedio de 4.6‰ del océano abierto. Sus datos también demuestran que la diagénesis en la columna de agua es un proceso menor en la fraccionación isotópica. Los valores $\delta^{15}\text{N}$ de los sedimentos superficiales son solamente 1.5‰ mayores que los valores en trampas de sedimento a profundidades intermedias. Estos resultados apoyan la sugerencia de que el proceso de denitrificación también es un factor que puede disminuir la razón N:P en el Golfo.

La extensión latitudinal a la cual se presenta la denitrificación en el Golfo de California podría considerarse con certeza hasta la cuenca de Guaymas (cerca de la E10), acorde a los datos de Altabet *et al.* (1999). Aunque el déficit de nitratos se manifiesta incluso en la E8, los niveles de oxígeno a los cuales podrían presentarse procesos de denitrificación se alcanzan aproximadamente a 400 m en esta estación. Se piensa que la denitrificación puede ocurrir a niveles de oxígeno $\leq 20 \mu\text{M}$ (Codispoti y Christensen,

1985). Esto implica, tomando en cuenta que en el déficit se consideraron profundidades de 100-1000 m, que el agua que llega a la E8 presenta cierto grado de denitrificación. Así, la deficiencia de nitratos se manifiesta hasta la región de las grandes islas.

Aunque existen métodos basados en las propiedades "NO" y "PO" para estudiar la relación N:P (e.g. Minster y Boulahdid, 1987) y los déficits de nitratos (e.g. Naqvi y Sen Gupta, 1985; Mantoura *et al.*, 1993) en el océano, se encontró que éstos no pueden ser aplicados en el GC. Las propiedades "NO" y "PO" propuestas por Broecker (1974) se basan en la relación $O_2 \text{ Consumido} : \text{Nutriente}_{\text{Remineralizado}}$. Así, por cada mol de oxígeno consumido se remineralizará cierta cantidad de nutriente, comúnmente en una proporción $N_{16}P:O_{138}$ (Redfield, 1934; Redfield *et al.*, 1963). En el GC como se ha mostrado aquí, la mezcla vertical en la región de las islas tan intensa que afecta fuertemente la distribución vertical de oxígeno y de nutrientes. Con esto, las propiedades "NO y PO" se verían alteradas y no cumpliría la relación de oxígeno consumido:nutriente remineralizado. Por otro lado, en la parte central del Golfo y a profundidades intermedias, la denitrificación también afectaría la propiedad "NO", ya que el nitrato no cumpliría con la relación de consumo-remineralización.

7.4. Comentarios finales

a) Razón N:P.

La razón N:P se refiere comúnmente a la relación $NO_3^-:PO_4^{3-}$, debido a que en general la disponibilidad de estos nutrientes limita la productividad primaria en el océano (Fanning, 1992). No obstante, si se considera al amonio en la razón N:P en la capa subsuperficial y a profundidades intermedias suponiendo una concentración de $1 \mu M$ (e.g. Libes, 1992), la razón podría ser $<1 \%$ menor que el valor que aquí se presenta. Esta concentración de NH_4^+ puede considerarse alta. En otras zonas denitrificantes se han observado valores máximos de amonio de $\sim 0.2 - 0.5 \mu M$ (e.g. Cline y Richards, 1972; Codispoti y Christensen, 1985).

b) ΔNO_3^- .

Si suponemos, de acuerdo a los datos de Fanning (1992) y de Millero (1996), que las aguas que entran al GC presentan una razón N:P de ~ 14 , los valores de ΔNO_3^- serían de

6.6 ± 3.1 en el verano y de 12.7 ± 5.2 en el invierno. De esta manera los valores también son similares a los reportados en la literatura. Sin embargo, el cálculo del déficit hecho con base en la razón $N_{16}:P$ puede considerarse como "adecuado". Fanning (1992) y Millero (1996) mencionan que las razones $N:P$ bajas en el Pacífico Norte son en cierta medida, producto de la denitrificación.

c) La propiedad PO.

Aunque la propiedad "PO" podría ser utilizada fuera de la zona de influencia de las grandes islas, en este trabajo se prefirió usar sólo al fosfato como predictor debido a que, 1) comúnmente estos parámetros se analizan a lo largo de superficies isopícnas y suponen que el cambio en las razones $N:P$ se debe a mezcla diapícnica horizontal (entre dos masas de agua). En el Golfo la mezcla es preferencialmente vertical en la zona de las grandes islas y en ella se involucran más de dos masas de agua. 2) finalmente, aunque podría hacerse una estimación del déficit de nitratos a partir de la relación PO-salinidad o PO- θ de una forma similar a como lo calcularon Naqvi y Sen Gupta (1985), habría que hacer consideraciones sobre el efecto de la mezcla en las relaciones propiedad-propiedad mencionadas. Este hecho no se encuentra dentro del objetivo del presente trabajo. No obstante, de esta información se desprenden nuevas ramas para el estudio de la biogeoquímica de los nutrientes en el GC.

7.5. Resumen

El Golfo de California es un mar marginal altamente productivo. Su productividad es comparable con las zonas más productivas del planeta. Se piensa que el aporte de nutrientes a las capas superficiales contribuye en gran medida a la productividad elevada característica del Golfo. Numerosos estudios sugieren que la distribución de nutrientes en el océano esta regulada por la interacción de procesos físicos y biológicos. Por esta razón, con el fin de entender los procesos que regulan el comportamiento de estos materiales en el GC, el objetivo del presente trabajo fue el de entender la relación de estos procesos con la distribución espacial y temporal de nutrientes. Mediante diagramas de mezcla se ha observado que la mezcla vertical es el proceso principal que controla la distribución vertical de los parámetros físicos y químicos en la región de las islas. Este

rasgo es consistente en las isotermas, isohalinas y nutrinas, y se manifiesta en una estructura con forma de "domo" sobre esta parte del Golfo. Se ha mostrado que la región de las islas funciona como una fuente de nutrientes y que la circulación termohalina juega un papel importante en el transporte de estos materiales hacia la parte centro-sur. Las figuras que aquí se presentan permiten concluir que en las capas superficiales del Golfo centro-sur, los procesos biológicos son importantes. El consumo fitoplanctónico abate las concentraciones de nutrientes en las capas superficiales de esta región en verano. El Golfo mostró enriquecimiento subsuperficial-superficial con nutrientes en invierno respecto al verano. Este fenómeno se observa en las distribuciones verticales en las estaciones del eje central y en las estaciones costeras. Las concentraciones de nutrientes por unidad de área fueron en general, mayores en la región de las islas y menores en la parte sur. Los datos sugieren que el enriquecimiento con nutrientes en invierno se debe al "rompimiento" de la estratificación, al retroceso del ASE, a la remineralización en la columna de agua y al aporte y transporte continuo de nutrientes desde la región de las islas. Las razones N:P son un parámetro importante en el entendimiento de los ciclos biogeoquímicos de los nutrientes. En el presente estudio se observaron razones N:P menores a la razón propuesta por Redfield *et al.* (1963). Existen varias razones que respaldan los valores encontrados aquí. Primero, estudios previos han mostrado que en el océano mundial se pueden diferenciar zonas amplias con razones N:P constantes. Las razones propuestas para el Pacífico Noreste concuerdan con las razones encontradas en el presente estudio. Segundo, se ha observado que las razones N:P bajas son comunes en mares con circulación restringida y también en mares marginales, tales como el GC. Tercero, trabajos recientes han mostrado que las zonas dominadas por diatomeas presentan razones N:P bajas, aparentemente debido al requerimiento de nutrientes propio de este grupo fitoplanctónico. En el GC las diatomeas son un grupo importante y es probable que su presencia disminuya las razones N:P. Por último, la denitrificación es un proceso presente en aguas intermedias del Golfo. Debido a que se pierde cierta cantidad de nitratos, este es otro factor que puede causar razones N:P bajas.

8. CONCLUSIONES

El golfo de California se encuentra enriquecido con nutrientes en las capas superficiales-subsuperficiales en comparación con el Océano Pacífico Norte.

La región de las islas funciona como una fuente de nutrientes y la circulación termohalina juega un papel importante en el transporte de estos materiales hacia la región centro-sur.

La mezcla vertical es el principal proceso que controla el comportamiento de nitratos y fosfatos en la región de las islas.

El consumo de nutrientes por fotosíntesis es un proceso importante en la parte centro-sur del Golfo.

El Golfo de California se enriquece con nutrientes durante el invierno con relación al verano. Este enriquecimiento se debe al aporte continuo de nutrientes por el "rompimiento" de la estratificación, a la remineralización de la materia orgánica a profundidades intermedias y a la menor influencia oligotrófica del ASE.

Las razones N:P en el Golfo fueron de 9.3 a 12.7, consistentes con las razones N:P reportadas para el Pacífico Norte. Recientemente se ha observado que esta es una condición común de los mares marginales. No obstante, los procesos de denitrificación y la actividad fotosintética predominante de las diatomeas, son factores que pueden disminuir la razón N:P en el Golfo.

9. LITERATURA CITADA

- Altabet, M.A., C. Pilskaln, R. Thunell, C. Pride, D. Sigman, F. Chavez and R. Francois (1999). The nitrogen isotope biogeochemistry of sinking particles from the margin of the Eastern North Pacific. *Deep-Sea Res.*, I 46:655-679.
- Alvarado-Aguilar, D. (1998). Uso de nutrientes como trazadores de masas de agua: boca del Golfo de California. Tesis de licenciatura, FCM, UABC, p. 44.
- Alvarez-Borrego, S. And G. Gaxiola-Castro (1988). Photosynthetic parameters of the Gulf of California phytoplankton. *Cont. Shelf Res.*, 8(1):37-47.
- Alvarez-Borrego, S. and R. Lara-Lara (1991). The physical environment and primary productivity of the Gulf of California. In Dauphin, J.P. and Simoneit, B.R. (eds), *The Gulf of California and Peninsular Province of the Californias.*, American Association of Petroleum Geologist., Memoir 47, Tulsa, pp. 555-567.
- Alvarez-Borrego, S., J.A. Rivera, G. Gaxiola-Castro, M.J. Acosta-Ruiz and R.A. Schwartzlose (1978). Nutrientes en el Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 5:53-71.
- Alvarez-Borrego, S. and R.A. Schwartzlose (1979). Masas de agua del Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 6:43-63.
- Alvarez-Borrego, S. (1983). Gulf of California. p. 427-449. In: Ketchum BH (ed). *Estuaries and Enclosed Seas.*, Elsevier, Amsterdam, 500 p.
- Argote, M.L. and M.F. Lavín (1998). Barotropic eulerian residual circulation in the Gulf of California due to the M2 tide and wind stress. *Atmósfera*, 11:173-197.
- Arrigo, K.R., D.H. Robinson, D.L. Worthen, R.B. Dunbar, G.R. DiTullio, M. VanWoert and M.P. Lizotte (1999). Phytoplankton community structure and the drawdown of nutrients and CO₂ in the Southern Ocean. *Science*, 283:365-367.
- Badán-Dangón A., C.J. Koblinski and T. Baumgartner (1985). Spring and summer in the Gulf of California: Observations of surface thermal patterns. *Oceanol. Acta.*, 8:13-22.
- Badán-Dangón A., C. Dorman, M. Merrifield and C. Winant (1991). The low atmosphere over the Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 96(C9):16877-16896.

- Bray, N.A. (1998a). Thermohaline circulation in the Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 93:4993-5020.
- Bray, N.A. (1998b). Water mass formation in the Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 93:9223-9240.
- Bray, N.A. and J.M. Robles (1991). Physical oceanography of the Gulf of California. In Dauphin, J.P. and Simoneit, B.R. (eds), *The Gulf of California and Peninsular Province of the Californias. American Association of Petroleum Geologist, Memoir 47*, Tulsa, pp 511-553.
- Broecker, W.S. (1974). "NO", a conservative water-mass tracer. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 23:100-107.
- Bruland, K., K.J. Orians and J.P. Cowen (1994). Reactive trace metals in the stratified North Pacific. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58(15):3171-3182.
- Castro, R., M.F. Lavín and P. Ripa (1994). Seasonal heat Balance in the Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 99:3249-3261.
- Castro, R., A.S. Mascarenhas, R. Durazo y C. Collins (sometido). Variación estacional de la temperatura y salinidad en la entrada del Golfo de California, México. *Ciencias Marinas*.
- Chavez, F.P., P.G. Strutton and M.J. McPhaden (1998). Biological-physical coupling in the central equatorial Pacific during the onset of the 1997-98 El Niño. *Geophys. Res. Lett.*, 25:3543-3546.
- Cline, J.D. and F.A. Richards (1972). Oxygen deficient conditions and nitrate reduction in the eastern Tropical North Pacific Ocean. *Limnol. Oceanog.*, 17:885-901.
- Codispoti, L.A. (1995). Is the ocean losing nitrate? *Nature*, 376:24.
- Codispoti, L.A. and J.P. Christensen (1985). Nitrification, denitrification and nitrous oxide cycling in the Eastern Tropical South Pacific Ocean. *Mar. Chem.*, 16:277-300.
- Constanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, Sh. Naeem, R.V. O'Neill, J. Paruelo, R.G. Raskin, P. Surtton and M. Van Den Belt (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387: 253-260.

- Cortés-Lara, M.C., S. Alvarez-Borrego and A.D. Giles-Guzmán (1999). Efecto de la mezcla sobre la distribución de nutrientes y fitoplancton en dos regiones del Golfo de California, en verano. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.*, 49: 1-14.
- Delgadillo-Hinojosa, F., G. Gaxiola-Castro, J.A. Segovia-Zavala, A. Muñoz-Barbosa and M.V. Orozco-Borbón (1997). The effect of vertical mixing on primary production in a bay of the Gulf of California. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 45:135-148.
- Delgadillo-Hinojosa, F., J.V. Macias-Zamora, J.A. Segovia-Zavala and S. Torres-Valdés (submitted). Cadmium enrichment in the Gulf of California. *Mar. Chem.*
- Demers, S., L. Legendre and J.C. Therriault (1986). Phytoplankton responses to vertical tidal mixing. p 1-40. In: Bowman MJ, Barber RT, Mooers Ch (Eds). *Lecture notes on coastal and estuarine studies: tidal mixing dynamics.*, Springer-Verlag, p. 502.
- Falkowsky, P.G., R.T. Barber and V. Smetacek (1998). Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. *Nature*, 281:200-206.
- Fanning, K.A. (1992). Nutrient provinces in the sea: concentration ratios, reaction rate ratios and ideal covariation. *J. Geophys. Res.*, 97:5693-5712.
- Fisher, T.R., J.R. Harding, D.W. Stanley and L.G. Ward (1988). Phytoplankton, nutrients and turbidity in the Chesapeake, Delaware and Hudson Stuaries. *Coast. Estuar. Shelf Sci.*, 27:61-93.
- Fonselius, S. (1996). The upwelling of nutrients in the central Skagerrak. *Deep-Sea Res.*, 43:57-71.
- Garside, C. (1985). The vertical distribution of nitrate in open ocean surface water. *Deep-Sea Res.*, 32:723-732.
- Gattuso, J.P., M. Frankignoulle and R. Wollast (1998). Carbon and carbonate metabolism in coastal aquatic ecosystems. *Annu. Rev. Syst.*, 29:405-434.
- Gaxiola-Castro, G. and S. Alvarez-Borrego (1986). Productividad primaria del Pacífico Mexicano. *Ciencias Marinas*, 12:26-33
- Gaxiola-Castro, G., S. Alvarez-Borrego, M.F. Lavín, A. Zirino and S. Nájera-Martínez (1999). Spatial variability of the photosynthetic parameters and biomass of the Gulf of California phytoplankton. *J. Plankton Res.*, 21:231-245.

- Gaxiola-Castro, G., J. Garcia-Cordova, J.E. Valdez-Holguín and M. Botello-Ruvalcaba (1995). Spatial distribution of chlorophyl a and primary productivity in relation to winter physical structure in the Gulf of California. *Cont. Shelf Res.*, 15(9):1043-1059.
- Hayward, T.L. (1987). The nutrient distribution and primary production in the central North Pacific. *Deep-Sea Res.*, 34(9):1593-1627.
- Hidalgo-González, R., S. Alvarez-Borrego y A. Zirino (1997). Mezcla en la región de las Grandes Islas del Golfo de California: efecto en la pCO₂ superficial. *Ciencias Marinas*, 23(3):317-327.
- Holligan, P.M. and H. de Boois (1993). Land Ocean Interactions in the Coastal Zone (LOICZ) Science Plan. IGBP Report No. 25, 50 pp.
- Jickells, T.D. (1998). Nutrient biogeochemistry of the coastal zone. *Science*, 281:217-221.
- Lara-Lara, J.R. y J.E. Valdéz-Holguín (1988). Biomasa y productividad primaria del Golfo de California por fracción de tamaños durante primavera de 1984. *Ciencias Marinas*, 14:1-14.
- Lara-Lara, J.R., R. Millán-Nuñez, J.L. Lara-Osorio, C. Bazán-Guzman (1993). Productividad y biomasa del fitoplancton por clases de tamaño, en la parte central del Golfo de California durante la primavera, 1985. *Ciencias Marinas*, 19:137-154.
- Lavín, M.F., E. Beier and A. Badán-Dangón (1997). Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: Escalas estacional e interanual, *En: M.F. Lavín, editor, Contribuciones a la Oceanografía Física en México.*, Monografía No. 3, Unión Geofísica Mexicana, p. 141-171
- Lavín, M.F., G. Gaxiola-Castro and J.M. Robles (1995). Winter masses and nutrients in the northern Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 100(C5):8587-8605.
- Lavín, M.F. and S. Organista (1988). The surface heat flux in the northern Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, 93:1433-1445.
- Libes, M.S. (1992). An Introduction to Marine Biogeochemistry. John Eiley & Sons, Inc. pp 734.

- Macias-Carranza, V.A. (1999). Pigmentos fitoplanctonicos por HPLC en el Golfo de California: periodo verano-invierno, 1996-1997. Tesis de Maestria, FCM e IIO., UABC.
- Mantoura, R.F.C., C.S. Law, N.J.P. Owens, P.H. Burkill, M.S. Woodward, R.J.M. Howald and C.A. Llewellyn (1993). Nitrogen biogeochemical cycling in the northwestern Indian Ocean. *Deep-Sea Res.*, II 40:651-671.
- Marinone, S.G. and P. Ripa (1988). Geostrophic flow in the Guaymas Basin, central Gulf of California. *Cont. Shelf Res.*, 8(2):159-166.
- Millán-Núñez, E. (1992). Distribución espacial del fitoplancton en la parte norte del Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 18(2):101-117.
- Millán-Núñez, R., R. Cajal-Medrano, E. Santamaría-del-Angel y E. Millán-Núñez (1993). Productividad primaria y clorofila *a* en la parte central del Golfo de California (otoño 1987). *Ciencias Marinas*, 19(1):29-40.
- Millero, F.J. (1996). Chemical Oceanography. Second edition. CRC Press, Inc. pp 469.
- Minster, J.F. and M. Boulahdid (1987). Redfield ratios along isopycnal surfaces- a complementary study. *Deep-Sea Res.*, 34(12):1981-2003.
- Mullineaux, C.W. (1999). The plankton and the planet. *Science*, 283:801-802.
- Naqvi, S.W.A. and R. Sen Gupta (1985). 'NO', a useful tool for the estimation of nitrate deficits in the Arabian Sea.. *Deep-Sea Res.*, 32:665-674.
- Nixon, S.W., C.A. Oviatt, J. Frithsen and B. Sullivan (1986). Nutrients and productivity of estuarine and coastal marine ecosystems. *J. Limnol. Soc. sth. Afr.*, 12(1/2):43-71.
- Ortíz-Cardenas, S.P. (1998). Fluctuaciones espacio-temporales de las características físicas y químicas del agua de mar frente a Coquimbo (30° S). Tesis de licenciatura. Universidad Católica de Valparaíso; Facultad de Recursos Naturales, Escuela de Ciencias del Mar. Valparaíso, Chile. 86 pp.
- Owens, N.J.P. (1993). Nitrate cycling in marine waters. *In: Burt, T.P., A.L. Heathwaite and S.T. Trudgill (eds). Nitrate: Processes, Patterns and Management.* John Wiley & Sons Ltd. p 169-209.
- Pauly, D. and V. Christensen (1995). Primary production required to sustain global fisheries. *Nature*, 374:255-257.

- Pernetta, J.C. and J.D. Milliam (1994). Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone Implementation plan. IGBP Report No. 33, Stockholm. 215 pp.
- Pike, J. and A.E.S. Kemp (1999). Diatoms mats in the Gulf of California sediments: Implications for the paleoenvironmental interpretation of laminated sediments and silica burial. *Geology*, 27(4):311-314.
- Radenac, M.H. and M. Rodier (1996). Nitrate chlorophyl distributions in relation to thermohaline and current structures in the western Tropical Pacific during 1985-1989. *Deep-Sea Res.*, 43:725-752.
- Redfield, A.C. (1934). On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton. James Johnstone Memorial Volume, Liverpool:176-192.
- Redfield, A.C., B.H. Ketchum and F.A. Richards (1963). The influence of organisms on the composition of sea water. In: M.N. Hill (ed), *The sea*, V.2. Interscience p. 26-77.
- Rees, A.P., A. Joint and K.M. Donald (1999). Early spring bloom phytoplankton-nutrient dynamics at the Celtic Sea Shelf Edge. *Deep-Sea Res.*, 46(1):483-510.
- Rosas-Cota, A. (1976). Corrientes geostróficas en el Golfo de California en la superficie y a 200 m durante las estaciones de invierno y verano. California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Report., 19:89-106.
- Rubin, S.I., T. Takahashi, D.W. Chipman and J.G. Goddard (1998). Primary productivity and nutrient utilization ratios in the Pacific sector of the Southern Ocean based on seasonal changes in seawater chemistry. *Deep-Sea Res.*, 45(1):1211-1234.
- Ryan, J.P., J.A. Yoder and C.P. Cornillon (1999). Enhanced chlorophyll at the shelfbreak of the Mid-Atlantic Bight and Georges Bank during the spring transition. *Limnol. Oceanogr.*, 44(1):1-11.
- Santamaría-del-Angel, E. and S. Alvarez-Borrego (1994). Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *J. Geophys. Res.*, 99:7411-7421.
- Santamaría-del-Angel, E., S. Álvarez-Borrego, R. Millán-Núñez y F.E. Müller-Karguer (1999). Sobre el efecto débil de las surgencias de verano en la biomasa fitoplanctonica del Golfo de California. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.*, 49:207-212.

- Smith, S.V., S. Ibarra-Obando, P.R. Boudreau & V.F. Camacho-Ibar (1997). *Comparison of carbon, nitrogen and phosphorus fluxes in Mexican coastal lagoons*, LOICZ Reports and studies No. 10, ii +84 pp. LOICZ, Texel, The Netherlands.
- Simpson, J.H. and D. Bowers (1981). Models of stratification and frontal movement in shelf seas. *Deep-Sea Res.*, 28A(7):727-738.
- Simpson, J.H., A.J. Souza and M.F. Lavín (1994). Tidal mixing in the Gulf of California. In: K.J. Beven, Chatwen P and Millbank J. (eds). *Mixing and Transport in the Environment*. John Wiley & Sons, London., pp. 169-182.
- Stigerbrandt, A. and L. Djurfeldt (1996) Control of organic matter in the ocean on short and long terms by stratification and remineralization. *Deep-Sea Res.*, 43(1):23-35.
- Strickland, J.D. and T.R. Parsons (1972). A practical handbook for seawater analysis. *Fisheries Research Board of Canada Bulletin.*, 167 p, 2nd ed.
- Thunell, R.C., C.J. Pride, E. Tappa and F.E. Muller-Karguer (1994). Biogenic silica fluxes and accumulation rates in the Gulf of California. *Geology*, 22:303-306.
- Torres-Orozco, E. (1993). Análisis volumétrico de las masas de agua del Golfo de California. Tesis de Maestría División de Oceanología, Dpto. de Oceanografía Física CICESE, Ensenada, B.C., 80 pp.
- Tyrrell, T. & S.C. Law (1997). Low nitrate:phosphate ratios in the global ocean. *Nature*, 387:793-796.
- Tyrrell, T. & S.C. Law (1998). Low nitrate:phosphate ratios corrected. *Nature*, 393:318.
- Verity, P.G., J.O. Blanton, J. Amft, C. Barans, D. Knott, B. Stender and E. Wenner (1998). Influences of physical oceanographic processes on chlorophyll distributions in coastal and estuarine waters of the South Atlantic Bight. *J. Mar. Res.*, 56:681-711.
- Walsh, J.J. (1991). Importance of continental margins in the marine biogeochemical cycles of carbon and nitrogen. *Nature*, 350:53-55.
- Williams, R.G. and M.J. Follows (1998). Eddies make ocean deserts bloom. *Nature*, 294:228-229.

Windom, H., J. Byrd, R. Smith Jr., M. Hungspreugs, S. Darmvanij, W. Thumtrakul and P. Yeats (1991). Trace metal-nutrient relationships in estuaries. *Mar. Chem.*, 32:177-194.

Zeitschel, B. (1969). Primary productivity in the Gulf of California. *Mar. Biol.*, 3(3):201-318.

Zeitschel, B. (1970). The quantity, composition and distribution of suspended particulate matter in the Gulf of California. *Mar. Biol.*, 7:305-318.